
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mustapha Stambouli Mascara



Faculté des Sciences Exactes

Département d'informatique

THÈSE DE DOCTORAT

Option : Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Techniques Naturelles et Bio-inspirées pour le Routage dans les Réseaux Sans Fil Mobiles

Présentée par **Mekkaoui Abdelkader**

Jury :

Présidente	Debbat Fatima	Professeur	Université M.Stambouli, Mascara
Encadreur	Smail Omar	Professeur	Université M.Stambouli, Mascara
Examineur	Belalem Ghalem	Professeur	Université Oran1 Ahmed Ben Bella
Examinatrice	Medber Meriem	MCA	Université M.Stambouli, Mascara
Examinatrice	Houari Amina	MCA	Université M.Stambouli, Mascara
Invité	Rebbah Mohamed	Professeur	Université M.Stambouli, Mascara

Année 2025

Dédicace

Je dédie cette thèse :

*À mes très chers parents,
pour leurs dévouements et leurs encouragements. Que ce travail soit un témoignage de ma
profonde gratitude envers eux.*

*À ma chère femme,
qui m'a toujours soutenu et encouragé durant les moments les plus difficiles.*

*À ma petite fille Nourhane (Nouna), source de lumière et de motivation, en témoignage de mon
amour et de ma détermination*

*À mes frères et sœurs, ainsi qu'à leurs enfants, qui occupent une place toute particulière dans mon
cœur.*

À tous les membres de la famille Mekkaoui.

Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ALLAH, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force et la détermination nécessaires pour mener à bien cette modeste thèse, ainsi que pour son soutien constant tout au long de ma vie.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de thèse, M. Smail Omar, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur ce sujet, pour la confiance qu'il m'a accordée, ainsi que pour ses précieux conseils, sa disponibilité et le temps qu'il a consacré à mon accompagnement tout au long de ces années de recherche. Ce travail n'aurait pas été possible sans son soutien, son suivi rigoureux et ses orientations généreuses.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de faire partie de ce jury de soutenance.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Mme. Debbat Fatima, qui a bien voulu honorer de sa présidence le jury de cette thèse. Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance à M. Belalem Ghanem, Mme. Medber Meriem et Mme. Houari Amina, qui ont accepté de faire partie du jury, leurs connaissances et expertise étant sources d'un grand respect.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers tous mes enseignants de l'université de Mascara, qui m'ont enrichi de leurs connaissances tout au long de mon parcours académique.

Enfin, un remerciement tout particulier à mes amis, mes collègues et à toutes les personnes qui m'ont soutenu, de près ou de loin. Merci à vous tous.

Résumé

Au cours des dernières décennies, les réseaux sans fil ont connu un développement fulgurant, soutenu par la miniaturisation des dispositifs électroniques, l'évolution rapide des technologies de communication, et la demande croissante en connectivité permanente et en temps réel. Le réseau MANET (Mobile Ad hoc Network) est un réseau sans fil auto-organisé composé d'un ensemble de nœuds mobiles interconnectés, capables de communiquer entre eux sans infrastructure préexistante ni point d'accès centralisé. Chaque nœud agit simultanément comme terminal utilisateur et comme routeur, assurant le transfert des données vers d'autres nœuds via des liens multi-sauts.

Cependant, la nature dynamique et distribuée de ces réseaux soulève des défis importants, notamment en matière de routage efficace. Le routage désigne l'ensemble des mécanismes permettant d'établir et de maintenir des chemins de communication entre des nœuds mobiles, dans un environnement dépourvu d'infrastructure fixe. En raison de la mobilité des nœuds, de la variabilité des liens et de la nature distribuée du réseau, les protocoles de routage doivent être capables de s'adapter dynamiquement à des changements fréquents de topologie. Ils doivent également gérer efficacement l'utilisation des ressources limitées, notamment l'énergie, la bande passante, etc.

De nombreux protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux MANETs, s'appuyant principalement sur des méthodes exactes ou approchées. Bien que les méthodes exactes garantissent une solution optimale, leur complexité computationnelle limite leur applicabilité dans des réseaux dynamiques. Les méthodes approchées, plus rapides, n'assurent pas toujours l'optimalité des solutions. C'est dans ce contexte que les méthodes bio-inspirées ont émergé, offrant une approche plus flexible et adaptative pour résoudre ces problèmes complexes. Le parallèle entre la dynamique des réseaux MANETs et les mécanismes naturels justifie l'usage des méthodes bio-inspirées pour concevoir des solutions de routage adaptatives.

Dans cette perspective, nous entamons cette thèse par la modélisation du problème afin de représenter avec précision le comportement des entités réelles constituant notre système. Par la suite, nous proposons deux nouveaux protocoles de routage multi-chemins qui reposent sur la métaheuristique évolution différentielle (Differential Evolution) pour les réseaux MANETs. Ainsi, nous proposons un protocole de routage multi-chemins pour les réseaux FANETs. Ce protocole est basé sur un algorithme bio-inspiré appelé recherche coucou (Cuckoo Research) qui fait partie de la famille des algorithmes d'intelligence en essaim. Il sélectionne les chemins optimaux entre une source et une destination en fonction de deux contraintes : énergie et stabilité. Enfin, nous proposons un protocole de routage multi-chemins pour les réseaux WBANs. Cette solution est basée sur l'algorithme évolutionnaire évolution différentielle. L'objectif principal de ce protocole est de choisir le chemin qui garantit une consommation d'énergie minimale en privilégiant des liaisons stables. Il introduit un modèle objectif basé sur l'efficacité énergétique des nœuds et la stabilité des liens afin d'évaluer les chemins valides. Comparées aux protocoles de routage abordés dans la littérature, nos approches ont présenté à travers les études expérimentales des résultats très satisfaisants.

Mots-clés : Réseau MANET, routage multi-chemins, méthodes bio-inspirées, énergie et stabilité.

Abstract

In recent decades, wireless networks have experienced rapid growth, driven by the miniaturization of electronic devices, the fast evolution of communication technologies, and the increasing demand for permanent and real-time connectivity. A MANET (Mobile Ad hoc Network) is a self-organizing wireless network composed of a set of interconnected mobile nodes capable of communicating with one another without any pre-existing infrastructure or centralized access point. Each node functions simultaneously as a user terminal and as a router, forwarding data to other nodes through multi-hop links.

However, the dynamic and distributed nature of these networks poses significant challenges, particularly with regard to efficient routing. Routing refers to the set of mechanisms that enable the establishment and maintenance of communication paths between mobile nodes in an environment lacking fixed infrastructure. Due to node mobility, link variability, and the decentralized structure of the network, routing protocols must be capable of dynamically adapting to frequent topology changes. They must also efficiently manage the use of limited resources, such as energy, bandwidth, and more.

Numerous routing protocols have been proposed for MANETs, primarily based on exact or approximate methods. While exact methods guarantee an optimal solution, their computational complexity limits their applicability in dynamic network environments. Approximate methods, although faster, do not always ensure solution optimality. In this context, bio-inspired methods have emerged, offering a more flexible and adaptive approach to solving such complex problems. The similarity between the dynamic behavior of MANETs and natural mechanisms justifies the use of bio-inspired techniques to design adaptive routing solutions.

In this perspective, we begin this thesis by modeling the problem in order to accurately represent the behavior of the real entities within our system. Subsequently, we propose two new multipath routing protocols based on the Differential Evolution metaheuristic for MANETs. In addition, we introduce a multipath routing protocol for FANETs, which is based on a bio-inspired algorithm known as Cuckoo Search, belonging to the family of swarm intelligence algorithms. This protocol selects optimal paths between a source and a destination based on two key constraints : energy and stability. Finally, we present a multipath routing protocol for WBANs, which also relies on the Differential Evolution algorithm. The main objective of this protocol is to select paths that ensure minimal energy consumption while prioritizing stable links. It introduces an objective model based on node energy efficiency and link stability to evaluate valid paths. Compared to the routing protocols discussed in the literature, our approaches have demonstrated highly satisfactory results in experimental evaluations.

Keywords : MANET, multipath routing, bio-inspired methods, energy and stability.

ملخص

على مدى العقود القليلة الماضية، شهدت الشبكات اللاسلكية نمواً سريعاً، مدفوعاً بتصغير حجم الأجهزة الإلكترونية، والتطور السريع لتقنيات الاتصالات، والطلب المتزايد على الاتصال الدائم في الوقت الفعلي MANET. (شبكة مخصصة متنقلة) هي شبكة لاسلكية ذاتية التنظيم تتكون من مجموعة من العقد المتنقلة المترابطة، القادرة على التواصل مع بعضها البعض دون الحاجة إلى بنية تحتية مسبقة أو نقطة وصول مركزية. تعمل كل عقدة كمحطة مستخدم وكجهاز توجيه في نفس الوقت، مما يضمن نقل البيانات إلى العقد الأخرى عبر روابط متعددة القفزات.

ومع ذلك، فإن الطبيعة الديناميكية والموزعة لهذه الشبكات تثير تحديات كبيرة، وخاصة فيما يتعلق بالتوجيه الفعال. يشير التوجيه إلى مجموعة الآليات المستخدمة لإنشاء مسارات الاتصال والحفاظ عليها بين العقد المتنقلة، في بيئة بدون بنية أساسية ثابتة. بسبب قابلية تنقل العقدة وتنوع الروابط والطبيعة الموزعة للشبكة، يجب أن تكون بروتوكولات التوجيه قادرة على التكيف ديناميكياً مع التغييرات المتكررة في الطوبولوجيا. ويحتاجون أيضاً إلى إدارة استخدام الموارد المحدودة بكفاءة، بما في ذلك الطاقة، وعرض النطاق الترددي، وما إلى ذلك. تم اقتراح العديد من بروتوكولات التوجيه لشبكات MANETs، بالاعتماد بشكل أساسي على الأساليب الدقيقة أو التقريبية. على الرغم من أن الأساليب الدقيقة تضمن الحل الأمثل، إلا أن تعقيدها الحسابي يحد من إمكانية تطبيقها في الشبكات الديناميكية. إن الطرق التقريبية، والتي هي أسرع، لا تضمن دائماً الحلول المثالية. وفي هذا السياق، ظهرت أساليب مستوحاة من العلوم البيولوجية، والتي تقدم نهجاً أكثر مرونة وقدرة على التكيف لحل هذه المشاكل المعقدة. إن التوازي بين ديناميكيات شبكات MANETs والآليات الطبيعية يبرر استخدام الأساليب المستوحاة من البيولوجيا لتصميم حلول التوجيه التكيفية.

ومن هذا المنظور، نبدأ هذه الأطروحة بنمذجة المشكلة من أجل تمثيل سلوك الكائنات الحقيقية التي تشكل نظامنا بشكل دقيق. وبعد ذلك، نقترح بروتوكولين جديدين للتوجيه متعدد المسارات يعتمدان على نظرية التطور التفاضلي لشبكات MANETs. وبالتالي، فإننا نقترح بروتوكول توجيه متعدد المسارات لشبكات FANETs. يعتمد هذا البروتوكول على خوارزمية مستوحاة من البيولوجيا تسمى Cuckoo Research، وهي جزء من عائلة خوارزميات ذكاء السرب. يقوم باختيار المسارات المثلى بين المصدر والوجهة بناءً على قيدين: الطاقة والاستقرار. وأخيراً، نقترح بروتوكول توجيه متعدد المسارات لشبكات WBAN. يعتمد هذا الحل على خوارزمية التطور التفاضلي. الهدف الرئيسي من هذا البروتوكول هو اختيار المسار الذي يضمن الحد الأدنى من استهلاك الطاقة من خلال تفضيل الروابط المستقرة. ويقدم نموذجاً موضوعياً يعتمد على كفاءة طاقة العقدة واستقرار الرابط لتقييم المسارات الصالحة. وبالمقارنة مع بروتوكولات التوجيه التي تمت مناقشتها في الأدبيات، فقد قدمت مناهجنا نتائج مرضية للغاية من خلال الدراسات التجريبية.

الكلمات الرئيسية: شبكة MANET، التوجيه متعدد المسارات، الأساليب المستوحاة من البيولوجيا، الطاقة والثبات.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte de la thèse	1
1.2	Les réseaux sans fil	2
1.3	Les réseaux MANETs	4
1.4	Problématique	9
1.5	Contributions	10
1.6	Organisation du manuscrit	11
1.7	Liste des publications	12
I	État de l’art et travaux connexes	13
2	Routage dans les réseaux MANETs	15
2.1	Introduction	15
2.2	Le routage dans les réseaux MANETs	16
2.2.1	Problématique de routage dans les réseaux MANETs	16
2.2.2	Conception des stratégies de routage	16
2.2.3	Taxonomie des protocoles de routage	17
2.2.3.1	Classification selon la méthode de construction et de maintenance des chemins	18
2.2.3.2	Classification selon la conception du réseau	21
2.3	Routage multi-chemins dans les réseaux MANETs	22
2.3.1	Concept et objectifs du routage multi-chemins	22
2.3.2	Les différents types de chemins multiples	24
2.3.3	Présentation des principaux protocoles de routage multi-chemins dans les ré- seaux MANETs	25
2.4	Classification des contraintes liées au routage dans les réseaux MANETs	29
2.4.1	Méthodes d’obtention des informations liées au calcul des contraintes de routage	30
2.4.2	Approches basées sur la mesure d’énergie	30
2.4.3	Approches basées sur la mesure de la stabilité des liens	34
2.4.4	Approches basées sur la mesure de la qualité des liens	38
2.4.4.1	Concept de transmission radio	39
2.4.4.2	Qualité du signal d’une liaison sans fil	39
2.4.4.3	Classification des estimateurs de la qualité des liens	40
2.4.4.4	Protocoles de routage basés sur la métrique de qualité des liens . . .	40
2.4.5	Approches basées sur la mesure de plusieurs contraintes	41
2.5	Conclusion	41

3	Méthodes bio-inspirées	43
3.1	Introduction	43
3.2	Diverses méthodes de résolution de problèmes	44
3.2.1	Les méthodes exactes	44
3.2.2	Les méthodes approchées	44
3.3	Les algorithmes bio-inspirés	45
3.3.1	Bio-inspiration en informatique	45
3.3.2	Pourquoi les algorithmes bio-inspirés ?	45
3.3.3	Passage d'un phénomène naturel vers un algorithme bio-inspiré	46
3.4	Taxonomie des algorithmes bio-inspirés	46
3.4.1	Algorithmes évolutionnaires classiques	46
3.4.2	Algorithmes basés sur l'intelligence distribuée	51
3.4.3	Algorithmes écologiques	65
3.4.4	Discussion	67
3.5	Conclusion	71
4	Routage à base des méthodes bio-inspirées dans les réseaux MANETs	73
4.1	Introduction	73
4.2	Motivations pour l'utilisation des méthodes bio-inspirées lors du routage dans les réseaux MANETs	74
4.3	Concepts et opérations fondamentaux du routage bio-inspiré Dans les réseaux MANETs	75
4.4	Protocoles de routage à base des méthodes bio-inspirées dans les réseaux MANETs .	78
4.4.1	Protocoles de routage basés sur les algorithmes évolutionnaires	78
4.4.1.1	Protocoles de routage basés sur l'algorithme d'évolution différentielle	78
4.4.1.2	Protocoles de routage basés sur l'algorithme génétique	79
4.4.2	Protocoles de routage basés sur l'intelligence distribuée	82
4.4.2.1	Protocoles de routage basés sur l'algorithme des colonies de fourmis	82
4.4.2.2	Protocoles de routage basés sur l'algorithme d'optimisation par essais particuliers	83
4.4.2.3	Protocoles de routage basés sur l'algorithme d'optimisation de l'élevage des éléphants	85
4.4.2.4	Protocoles de routage basés sur l'algorithme de recherche coucou . .	86
4.4.2.5	Protocoles de routage basés sur l'algorithme de colonie d'abeilles artificielle	88
4.5	Discussion	89
4.6	Conclusion	93
II	Contributions	95
5	Protocoles de routage multi-chemins SDERP et ES-RPDE	97
5.1	Introduction	97
5.2	Le protocole de routage multi-chemins SDERP	98
5.2.1	Présentation du protocole de routage SDERP	99
5.2.2	Évaluation des performances du protocole SDERP	107
5.3	Le protocole de routage multi-chemins ES-RPDE	114
5.3.1	Présentation du protocole de routage ES-RPDE	115
5.3.2	Évaluation des performances du protocole ES-RPDE	117
5.4	Conclusion	120

6	Protocole de routage multi-chemins SE-RPCS	123
6.1	Introduction	123
6.2	Les réseaux FANETs	124
6.2.1	Les drones	124
6.2.2	Architectures de communication d'un réseau FANET	127
6.3	Le routage dans les réseaux FANETs	129
6.4	Présentation du protocole de routage SE-RPCS	130
6.4.1	Processus de découverte des chemins	130
6.4.2	Processus de recherche du coucou	132
6.5	Évaluation des performances du protocole SE-RPCS	136
6.5.1	Environnement et paramètres de simulation	136
6.5.2	Résultats de simulation et discussion	136
6.6	Conclusion	138
7	Protocole de routage multi-chemins DERP	139
7.1	Introduction	139
7.2	Les réseaux de capteurs corporels WBANs	140
7.2.1	Définition d'un réseau WBAN	140
7.2.2	Architecture des réseaux WBANs	140
7.2.3	Applications des réseaux WBANs	141
7.2.4	Technologies de communication des réseaux WBANs	142
7.3	Présentation du protocole de routage DERP	142
7.3.1	Hypothèses et définitions du problème	142
7.3.2	Les étapes du protocole DERP	143
7.3.3	Procédure de maintenance des chemins du protocole DERP	149
7.4	Évaluation des performances du protocole DERP	149
7.4.1	Environnement et paramètres de simulation	150
7.4.2	Résultats de simulation et discussion	151
7.5	Conclusion	153
8	Conclusion et perspectives	155
8.1	Conclusion	155
8.2	Perspectives	157
	Table des figures	160
	Liste des tableaux	161
	Bibliographie	162

Chapitre 1

Introduction générale

Contents

1.1	Contexte de la thèse	1
1.2	Les réseaux sans fil	2
1.3	Les réseaux MANETs	4
1.4	Problématique	9
1.5	Contributions	10
1.6	Organisation du manuscrit	11
1.7	Liste des publications	12

1.1 Contexte de la thèse

Au cours des dernières décennies, avec l'expansion d'Internet, l'émergence des normes IEEE-802.11, Bluetooth et des interfaces matérielles associées a facilité la création de nouvelles entités mobiles qui combinent les caractéristiques des micro-ordinateurs et des smartphones. Ces entités récentes ont deux points communs : la communication sans fil et la mobilité. En outre, certaines de ces technologies radio proposent de nouvelles opportunités de communication, notamment en permettant de contourner les infrastructures existantes et d'implémenter une communication dite ad hoc.

Grâce aux progrès récents dans les technologies de communication sans fil et à l'émergence des appareils mobiles (ordinateurs portables, smartphones, etc.), il est désormais possible d'accéder au réseau partout et à tout moment, sans nécessité de connecter les appareils communicants à une infrastructure. Un bénéfice incontestable de ces technologies sans fil est la capacité de « rester connecté tout en étant mobile ».

Aujourd'hui, les technologies sans fil présentent des opportunités prometteuses dans le secteur des télécommunications. Les réseaux MANETs (Mobile Ad hoc Networks) ou réseaux ad hoc se caractérisent par la présence d'un groupe d'entités mobiles qui se déplacent de manière aléatoire, interconnectés entre eux par une technologie sans fil et capables de s'organiser en l'absence d'infrastructure préétablie. Les usages des réseaux MANETs sont variés, notamment leur utilisation traditionnelle dans le secteur militaire ainsi que pour d'autres applications tactiques comme les interventions de secours et les missions d'exploration. Les propriétés principales d'un réseau MANET

sont : topologie dynamique, hétérogénéité des entités mobiles, contraintes d'énergie, bande passante limitée, sécurité physique limitée, etc.

1.2 Les réseaux sans fil

Définition d'un réseau sans fil

Un réseau sans fil (en anglais : wireless network) est un système de communication composé d'un ensemble d'entités qui interagissent entre elles en utilisant des ondes hertziennes à travers leurs interfaces sans fil [1]. Ce type d'infrastructure permet aux utilisateurs de se connecter à n'importe quel endroit et à tout moment. La mobilité est la principale caractéristique des réseaux sans fil, où les utilisateurs peuvent se déplacer librement pendant la transmission des données [2].

Types des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil offrent aux utilisateurs la possibilité de bénéficier de tous les services classiques des réseaux, peu importe leur localisation géographique. Ils peuvent être classés en fonction de deux critères [3].

1. **En fonction de la zone de couverture :** Généralement, ce classement se base sur la portée et/ou le débit. Chaque catégorie est associée à une norme (standard), une technologie et un genre d'application. La Figure 1.1 illustre les types des réseaux sans fil selon la zone de couverture.

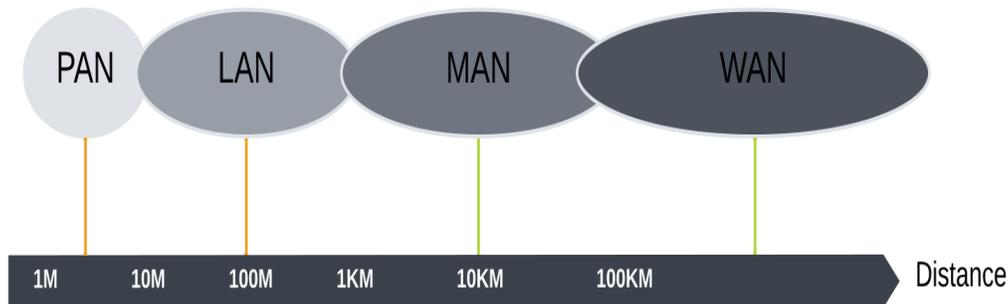


FIG. 1.1 – Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture.

- (a) **Les réseaux WPANs** : (en anglais : wireless personal area networks) appelés également réseaux personnels ou réseaux individuels sans fil, sont des réseaux à faible portée (environ une dizaine de mètres). En général, ce type de réseau est utilisé pour connecter des périphériques tels qu'une imprimante, un téléphone portable, un appareil domestique, etc.) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans connexion filaire, ou pour permettre une liaison sans fil entre deux machines très peu proches. Les réseaux WPANs peuvent être utilisés avec différentes technologies telles que Bluetooth [4], ZigBee [5] et IrDA [6].
- (b) **Les réseaux WLANs** : (en anglais : wireless local area networks) Les réseaux locaux sans fil sont couramment employés à l'intérieur d'une entreprise, d'une université, mais aussi chez les particuliers depuis le développement des normes qui permettent un débit élevé. L'essentiel de ces réseaux repose sur des technologies comme IEEE 802.11 WiFi [6], Hiperlan1 et Hiperlan2 [7].

- (c) **Les réseaux WMANs** : (en anglais : wireless metropolitan area networks), également appelés réseaux métropolitains ou boucles radiolocales (BLR). Ils ont une portée d'environ quelques dizaines de kilomètres (50 kilomètres de portée théorique annoncée) et un taux de transmission radio théorique pour IEEE 802.16 qui atteint 74 Mbit/s, connu sous le nom commercial de WiMAX [8].
- (d) **Les réseaux WWANs** : (en anglais : wireless wide area networks), également appelés réseaux étendus. Actuellement, il y a assez peu de technologies dans cette catégorie. Il n'existe que des technologies de WWAN qui utilisent des satellites géostationnaires ou en orbite basse pour transmettre l'information entre différents points du globe. Parmi les technologies les plus importantes nous avons GSM et GPRS [9].
2. **En fonction de l'infrastructure** : Selon l'infrastructure, les réseaux sans fil peuvent être répartis en deux classes :

(a) **Réseaux cellulaires (avec infrastructure)**

Certaines stations fixes, également connues sous le nom de stations support mobile (mobile support station) ou stations de base (SB), sont équipées d'une interface de communication sans fil pour communiquer directement avec des sites ou des unités mobiles (UM) situés dans une zone géographique restreinte, connue sous le nom de cellule. Chaque station de base est équipée d'une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent envoyer et recevoir des communications. Tandis que les sites fixes sont reliés les uns aux autres par un réseau de communication filaire, souvent fiable et à haut débit. Les connexions sans fil présentent une bande passante restreinte, ce qui diminue considérablement le volume des informations transmises. Dans ce modèle, une unité mobile ne peut être connectée directement qu'à une seule station de base à un moment donné [10] (voir Figure 1.2).

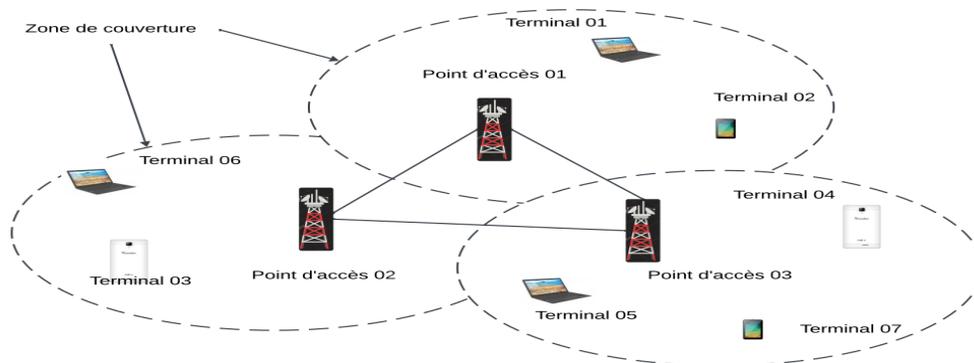


FIG. 1.2 – Exemple d'un réseau cellulaire.

(b) **Réseaux ad hoc (sans infrastructure ou MANETs)**

Ce type de réseaux ne comprend pas de site fixe. Tous les sites du réseau sont mobiles et communiquent directement en utilisant leurs interfaces de communication sans fil. Le manque d'infrastructure ou de réseau filaire constitué des stations de base contraint les unités mobiles à agir comme des routeurs qui contribuent à la découverte et à la maintenance des chemins pour les autres utilisateurs du réseau [11]. (voir Figure 1.3)

Techniques de communication dans les réseaux sans fil

On peut établir la communication dans les réseaux sans fil en utilisant différents modes tels que [12] (voir Figure 1.4) :

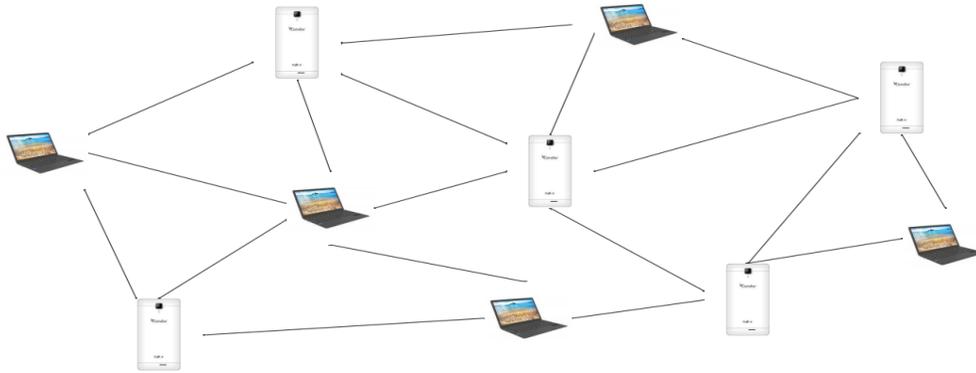


FIG. 1.3 – Exemple d'un réseau ad hoc.

- **Unicast** : signifie que le nœud source envoie le message à un seul nœud spécifié (1 nœud vers un autre).
- **Multicast** : la technologie multicast consiste à envoyer le message à un groupe de nœuds (1 nœud vers plusieurs nœuds).
- **Broadcast** : dans ce mode de communication, le message est transmis par le nœud source à tous les nœuds du réseau. Dans le réseau sans fil, ce message ne sera transmis qu'aux nœuds voisins directement connectés (1 nœud vers tous qui se trouvent dans la portée du nœud source).

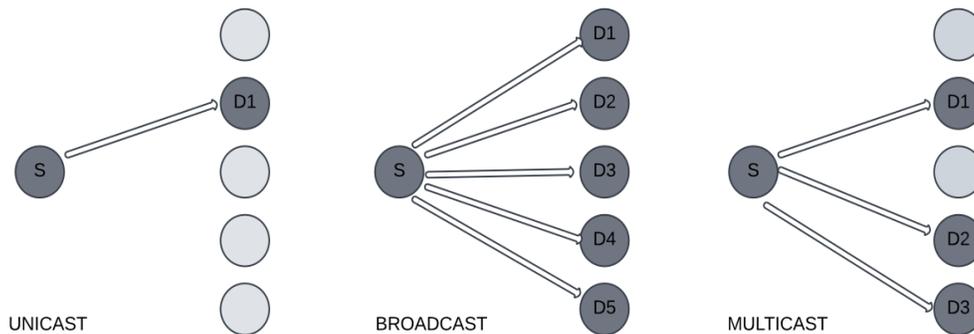


FIG. 1.4 – Mode de communication dans un réseau sans fil.

1.3 Les réseaux MANETs

Définition d'un réseau MANET

Un réseau MANET (Mobile Ad hoc Network), également connu sous le nom de réseau mobile ad hoc, est un réseau sans fil qui n'a pas d'infrastructure fixe et qui utilise généralement le média radio, avec une création et une organisation dynamiques. Une deuxième définition a été fournie : « Un réseau MANET est un réseau autonome qui se forme spontanément à partir d'un ensemble d'entités mobiles communicantes (téléphones mobiles, ordinateurs portables, etc.) sans avoir besoin d'infrastructure fixe préexistante » [13]. Ces entités se distinguent par leurs ressources limitées, comprenant une source d'énergie restreinte (généralement des batteries), des capacités de calcul restreintes.

Caractéristiques des réseaux MANETs

On distingue les réseaux MANETs par leurs ([14] [15]) :

- **Topologie dynamique** : les nœuds mobiles sont des éléments indépendants du réseau et ont la liberté de se déplacer de manière indépendante. À des moments imprévisibles, la configuration du réseau peut évoluer de façon aléatoire, rapide et peut inclure des liaisons bidirectionnelles et unidirectionnelles. Les nœuds peuvent aisément s'échapper ou entrer dans la portée radio de différents autres nœuds, ce qui rend la localisation d'un nœud spécifique plus complexe. À mesure que leur mouvement devient aléatoire, les informations de routage des nœuds évoluent constamment.
- **Autonomie et sans infrastructure** : les réseaux MANETs sont des systèmes dépourvus d'infrastructure qui ne possèdent ni serveur central ni matériel spécialisé ni routeurs fixes. Les connexions entre les nœuds sont exclusivement assurées par une connectivité sans fil. Il est nécessaire de répartir la gestion du réseau sur divers nœuds, ce qui complique la détection et la gestion des pannes.
- **Auto-configuration** : les réseaux MANETs sont des réseaux qui peuvent être configurés automatiquement, où les nœuds eux-mêmes effectuent les activités du réseau, telles que la découverte de la topologie et la livraison des messages. Chaque nœud mobile est un nœud autonome, capable de faire office d'hôte et de routeur, et de produire des données autonomes.
- **Scalabilité** : La majorité des applications MANET nécessitent des réseaux étendus comprenant des milliers de nœuds (par exemple : réseaux de capteurs), et il est crucial d'avoir une évolutivité pour assurer un déploiement réussi de ces réseaux. Sur le plan de l'évolutivité, il existe des difficultés dans des domaines tels que : l'adressage, la gestion de la localisation, la gestion du routage, l'interopérabilité, la sécurité, etc.
- **Contraintes d'énergie** : les hôtes mobiles sont de petite taille et légers, offrant une capacité de processeur réduite, un stockage à faible consommation d'énergie et une mémoire de petite taille. Les ressources énergétiques qu'ils utilisent sont limitées, comme de petites batteries. Pour ces nœuds, la préservation de l'énergie peut être l'un des critères de conception de système les plus cruciaux pour l'optimisation. La vulnérabilité découle de cette limitation et certaines attaques peuvent tenter d'engager inutilement les nœuds mobiles, ce qui permet à ceux-ci de continuer à utiliser leur batterie.
- **Liaisons sans fil** : le réseau MANET est peu fiable et vulnérable à différents types d'attaques en raison des liaisons sans fil, qui ont une capacité bien inférieure à celle de leurs homologues câblés. Dans ce type de réseaux, les liaisons sans fil entre les nœuds ne sont pas cohérentes pour les participants à la communication en raison de l'alimentation électrique limitée et de la mobilité des nœuds. En outre, les conséquences des multiples conditions d'accès, des pertes de vue, du bruit et des interférences peuvent altérer la capacité d'une liaison sans fil au fil du temps, ce qui peut entraîner une diminution du débit effectif par rapport à la capacité de transmission maximale de la radio.
- **Limitation du canal de transmission** : la bande passante utilisée pour la transmission des messages, en particulier à travers une interface sans fil, demeure toujours inférieure à celle du réseau filaire. Le réseau sans fil est également vulnérable aux éléments externes tels que le bruit et les obstacles qui perturbent le signal, ce qui entraîne un taux d'erreur élevé.

Familles des réseaux MANETs

Un réseau MANET est un réseau multi-sauts qui se caractérise principalement par la capacité de mobilité des terminaux qui le composent [16]. Les études sur les réseaux MANETs portent sur ce que l'on nomme « MANET pur à usage-général » (en anglais : pure general-purpose MANET). Pur

signifie que les fonctionnalités du réseau ne sont pas supposées être assurées par des infrastructures et qu'aucune autorité n'est responsable de gérer et de contrôler le réseau. L'expression « utilisation générale » indique que ces réseaux ne sont pas spécifiquement conçus pour une application, mais qu'ils peuvent être utilisés par toutes les applications TCP/IP classiques. Les sous-sections ci-dessous présentent les quatre familles des réseaux MANETs :

Réseaux véhiculaires ad hoc (VANETs)

Les progrès technologiques, en particulier dans les secteurs de la télécommunication, ont favorisé l'apparition du concept des systèmes de transport intelligents (ITSs). Les ITSs sont les nouvelles utilisations des technologies de l'information et de la communication dans le secteur du transport urbain [17]. L'objectif de cette évolution est de renforcer la sécurité, l'efficacité, la fiabilité et l'écologie des systèmes de transport.

Il est possible que les communications dans un système de transport intelligent se basent sur une infrastructure de télécommunication déjà existante (V2R) ou se déroulent directement entre les véhicules (V2V). Les communications sans infrastructure sont assurées par les réseaux ad hoc véhiculaires. Dans un réseau VANET, la mobilité (vitesse et déplacement) des nœuds est limitée par l'environnement et le trafic routier [17].

Réseaux de drones ad hoc (FANETs)

Les réseaux FANETs sont une branche des réseaux VANETs. Ces réseaux ont vu le jour en réponse à la nécessité de connecter plusieurs drones ou UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) au sein d'un système multi-UAV. Selon [18], un drone est un avion sans pilote capable de naviguer de manière autonome grâce à un système embarqué ou à l'aide d'un système de commande à distance. Un drone est généralement muni de capteurs afin de localiser sa position et recueillir des données sur une zone d'intérêt. Les drones offrent de nouvelles opportunités tant dans le domaine militaire que civil, comme : les activités de secours et de recherche lors des catastrophes, le repérage et la recherche de cibles militaires, la surveillance des feux de forêts, la détection à distance dans l'agriculture, etc.

Dans un système multi-UAV [19], les stations de base terrestres ou satellitaires garantissent les échanges entre les UAVs. Néanmoins, en raison de l'augmentation du nombre d'UAVs dans le système, la communication directe entre les UAVs s'avère une option intéressante par rapport à la communication centralisée via les stations de base. Il est possible de réaliser cela en créant un réseau spécifique entre les UAVs. Effectivement, l'emploi de divers drones en mode ad hoc offre plusieurs bénéfices tels que [18] : Le passage à l'échelle, la réduction des délais des missions, la réduction des frais d'entretien, etc.

Réseaux acoustiques sans fil sous-marins (SANETs)

Les océans jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat, la fourniture de ressources essentielles et la promotion d'une biodiversité exceptionnelle. Leurs surveillances sont d'une importance cruciale à l'ère moderne, où les pressions anthropiques et le changement climatique mettent en péril l'équilibre délicat de ces vastes étendues d'eau. Grâce à des avancées technologiques considérables, la surveillance des océans permet de collecter des données essentielles pour comprendre la dynamique marine, anticiper les changements environnementaux et prendre des mesures préventives dans la gestion des ressources, ce qui implique l'utilisation de dispositifs de communication en milieu sous-marin tels que les ondes acoustiques, les ondes optiques et les ondes à haute fréquence. Les ondes acoustiques sont utilisées sur de grandes distances en raison de leur pouvoir de propagation [20].

Un réseau SANET est un système de communication composé de capteurs autonomes déployés dans des environnements sous-marins pour surveiller, collecter des données et transmettre des in-

formations. Ces capteurs sans fil sous-marins sont conçus pour fonctionner dans des conditions difficiles et permettent une surveillance collaborative en temps réel des océans, des lacs ou d'autres plans d'eau. Contrairement à d'autres types de réseaux mobiles sans fil qui utilisent des ondes radiofréquences, les réseaux de capteurs acoustiques sans fil exploitent le son pour la transmission de données sous l'eau, où les ondes radio ont une portée limitée en raison de l'atténuation rapide du signal.

Réseaux de capteurs sans fil (WSNs)

Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) sont perçus comme une catégorie spécifique des réseaux MANETs comprenant des nœuds capteurs disposant de capacités de calcul et de communication restreintes, déployés en large quantité, notamment dans les régions adverses. Les nœuds capteurs sont en mesure de réaliser trois opérations complémentaires : la mesure d'une valeur physique, le traitement potentiel de cette donnée et l'échange avec d'autres capteurs. Tous ces capteurs, mis en œuvre dans le cadre d'une application, constituent un réseau de capteurs. Par exemple, les réseaux corporels sans fil WBANs (Wireless Body Area Networks) sont une catégorie spécifique des réseaux WSNs conçue pour fonctionner à proximité ou directement sur le corps humain. Contrairement aux WSNs classiques, qui sont déployés dans des environnements étendus comme des champs agricoles ou des usines pour surveiller des paramètres environnementaux, les WBANs sont principalement utilisés dans les domaines médical, sportif et interactif. Leur portée est généralement limitée à quelques mètres autour du corps, et ils intègrent des capteurs ultra-basse consommation pour minimiser la consommation énergétique et maximiser l'autonomie des dispositifs [21].

Même si les réseaux VANETs, FANETs, SANETs, y compris les WSNs sont tous des MANETs, chaque famille a ses propres contraintes, à la fois en raison de la nature des unités qui les composent et de leurs domaines d'applications.

Domaines d'application des réseaux MANETs

Contrairement aux réseaux filaires, les réseaux MANETs ne nécessitent aucune installation fixe, ce qui leur confère une rapidité et une facilité de mise en place. Effectivement, grâce à leur robustesse et à leur coût abordable, ces réseaux sont largement utilisés dans divers secteurs [22] [23] :

- **Services de secours** : la mise en place de réseaux MANETs est extrêmement bénéfique dans les situations d'urgence comme les opérations de contrôle des foules, de reprise après un sinistre, de recherche et de sauvetage. Un bon moyen de coordonner les activités de sauvetage serait de mettre en place immédiatement des réseaux sans fil ad hoc. Étant donné que les réseaux spécialisés requièrent une configuration réseau initiale minimale pour leur fonctionnement, il est essentiel de prendre très peu ou pas de retard afin de rendre le réseau opérationnel à 100%. Des réseaux MANETs peuvent être rapidement mis en place par les sections d'intervention d'urgence afin de remplacer les infrastructures détruites, ce qui permet aux équipes de mieux coordonner leurs actions. En cas d'urgence, il est possible que les réseaux câblés soient détruits et qu'un réseau sans fil soit nécessaire pour la coordination des secours.
- **Secteur militaire** : pendant les opérations militaires stratégiques, on peut utiliser les réseaux MANETs pour établir des communications sur le terrain entre les sections de soldats mis en place.
- **Éducation** : lors des réunions par visioconférence, les participants ont la possibilité de communiquer entre eux et de partager les ressources sans nécessiter d'infrastructures. Par exemple, lancer un streaming vidéo entre des nœuds sans fil sans passer par des stations de base.
- **Médical** : lors des surveillances des patients, la surveillance des patients est assurée par la communication entre les dispositifs médicaux portables et les stations de base, permettant ainsi

une surveillance en temps réel des signes vitaux des patients, même dans des espaces non équipés. Lors des situations d'urgence médicale, les réseaux MANETs permettent de mettre en place des communications rapides dans des zones non desservies par les infrastructures de santé.

- **Transport** : les réseaux MANETs, en particulier les réseaux FANETs, offrent aux véhicules la possibilité de communiquer entre eux afin d'améliorer la sécurité (notifications de collision, trafic, conditions météorologiques). Au moment de la gestion du trafic routier, ces réseaux recueillent les informations en temps réel afin d'améliorer les flux de circulation.

Avantages et inconvénients des réseaux MANETs

L'aspect dynamique et l'absence d'une structure fixe pour les réseaux MANETs permettent d'avoir une idée des principaux avantages et inconvénients de ce dispositif [22].

Avantages des réseaux MANETs

- **La flexibilité et la rapidité de déploiement** : les réseaux MANETs peuvent être installés rapidement sans avoir besoin d'infrastructure préalable, ce qui les rend parfaits pour des situations d'urgence ou des environnements étroits.
- **Autonomie** : les réseaux MANETs opèrent de façon autonome, offrant ainsi la possibilité de communiquer entre les dispositifs sans avoir recours à une infrastructure centralisée.
- **Scalabilité** : les réseaux MANETs ont la capacité de s'ajuster aisément au nombre de dispositifs connectés. Il est possible d'ajouter de nouveaux nœuds sans avoir effectué de modifications importantes.
- **Robustesse** : les réseaux MANETs présentent souvent une plus grande résistance face aux pannes ou aux attaques grâce à leur structure décentralisée. En cas d'échec d'un nœud, le réseau reste toujours fonctionnel.
- **Efficacité des coûts** : puisque les réseaux MANETs ne requièrent pas d'infrastructure coûteuse, ils peuvent diminuer les dépenses liées au déploiement et à la maintenance.
- **Interopérabilité** : souvent, les réseaux MANETs peuvent être utilisés avec divers types de dispositifs, ce qui facilite l'intégration de différentes technologies.
- **Capacité d'extension** : l'élargissement des réseaux MANETs se fait simplement en ajoutant de nouveaux nœuds qui rejoignent le réseau sans nécessiter de moyens ou de matériel.

Inconvénients des réseaux MANETs

- **Consommation d'énergie** : les unités mobiles à batterie doivent souvent fonctionner de manière autonome, ce qui peut engendrer des difficultés d'autonomie.
- **Gestion complexe** : dans les grands réseaux MANETs, il peut devenir complexe de gérer dynamiquement les nœuds et de maintenir la connectivité.
- **Bande passante limitée** : dans les réseaux MANETs, les résultats peuvent varier en fonction du nombre de nœuds actifs et de la congestion du réseau, ce qui entraîne une diminution de la fiabilité des communications.
- **Latence** : dans les réseaux MANETs, il est possible que les délais de réponse soient plus longs à cause du routage dynamique et de la découverte des nœuds.
- **Qualité de service** : dans les réseaux MANETs, il est compliqué d'assurer une qualité de service stable, en particulier pour des applications sensibles telles que la voix ou la vidéo. -
- **Sécurité limitée** : L'un des principaux inconvénients des réseaux MANETs réside dans la difficulté à garantir un niveau de sécurité satisfaisant. En raison de leur architecture décentralisée, de la mobilité des nœuds et de l'absence d'infrastructure fixe, ces réseaux sont particulièrement

vulnérables à diverses menaces telles que l'écoute passive, les intrusions, les attaques par déni de service, ou encore la falsification de messages. La détection et la prévention de ces attaques restent complexes, notamment en environnement dynamique.

1.4 Problématique

Le routage constitue un défi majeur dans les réseaux MANETs. Cela implique la mise en place d'une stratégie qui assure, à tout instant, la connexion entre deux nœuds quelconques du réseau, ainsi que la détermination des chemins valides depuis un point de source vers une destination spécifique et l'entretien de ces chemins en les ajustant aux modifications de la topologie et aux autres propriétés du réseau ad hoc. En dépit de ces défis, un grand nombre de protocoles de routage ont été élaborés.

La conception des protocoles de routage classiques pour les réseaux MANETs est basée sur trois étapes à savoir la découverte des chemins et la sélection du chemin optimal qui repose sur le nombre de sauts et la maintenance des chemins. Ces protocoles de routage sont classifiés selon le principe de chaque processus en trois catégories. Les protocoles de routage proactifs, basés sur des algorithmes classiques comme l'état de lien et le vecteur de distance, maintiennent en permanence des tables de routage à jour grâce à des échanges périodiques d'informations. Les protocoles de routage réactifs, fonctionnant à la demande, établissent un chemin uniquement lorsqu'une communication est nécessaire, évitant ainsi les mises à jour périodiques. Les protocoles de routage hybrides combinent les approches proactives et réactives pour optimiser l'efficacité du routage. Ils maintiennent des informations de routage localement tout en lançant une découverte des chemins à la demande pour les destinations lointaines. Ces protocoles de routage offrent un équilibre entre rapidité d'accès aux chemins et optimisation des ressources. Cependant, ils présentent des limites : les protocoles proactifs surchargent le réseau, les réactifs augmentent la latence, et les hybrides complexifient la gestion.

Pour améliorer l'efficacité du routage, des protocoles de routage basées sur le routage à chemin unique ont été adoptées, où un seul chemin est sélectionné pour la transmission des données. Bien que cette approche simplifie le processus de routage, elle présente une vulnérabilité aux pannes de liens, ce qui peut entraîner une interruption de la communication et une nécessité fréquente de redécouverte des chemins. Face à ces limitations, le routage multi-chemins a émergé comme une alternative permettant d'augmenter la robustesse et la résilience du réseau. En exploitant plusieurs chemins simultanément ou en les conservant en tant que chemins de secours, cette méthode réduit la latence de récupération en cas de défaillance et améliore l'équilibrage de charge. Toutefois, la gestion et la mise à jour de plusieurs chemins ajoutent une complexité computationnelle et un surcoût en termes de stockage et de messages de contrôle.

Une autre avancée majeure repose sur le routage multi-chemins à base de contraintes, qui prend en compte des critères spécifiques tels que l'énergie des nœuds, la stabilité ou la qualité des liens dans la sélection des chemins optimaux. Cette approche permet d'optimiser l'utilisation des ressources et d'adapter le routage aux exigences des applications. Néanmoins, elle requiert des mécanismes avancés de collecte et d'analyse des informations réseau, ce qui peut engendrer une surcharge computationnelle.

Effectivement, le routage est une question complexe qui doit tenir compte des divers défis de ces réseaux tout en préservant leur efficacité. Les méthodes bio-inspirées offrent une alternative prometteuse en s'inspirant de phénomènes naturels. Ces approches permettent un routage dynamique, adaptatif et décentralisé, réduisant ainsi la surcharge des messages de contrôle et optimisant la sélection des chemins en fonction des contraintes du réseau. Grâce à leur capacité d'auto-organisation et d'apprentissage, ces méthodes offrent des solutions efficaces et évolutives pour le routage dans

les réseaux MANETs.

Dans le contexte de cette thèse, notre travail consiste à développer de nouvelles méthodes bio-inspirées pour résoudre le problème du routage dans les réseaux MANETs de manière générale, ainsi que dans certains types particuliers des réseaux MANETs tels que les FANETs, WBANS, etc. Les solutions se basent lors du choix des chemins optimaux sur des contraintes usuelles, principalement l'énergie résiduelle des nœuds et la stabilité des liens.

1.5 Contributions

Nos travaux s'articulent principalement autour de l'implémentation de nouvelles méthodes méta-heuristiques bio-inspirées pour la résolution du problème de routage dans les réseaux MANETs.

- La première contribution consiste à proposer deux protocoles de routage multi-chemins, basés sur la méthode bio-inspirée évolution différentielle (Differential Evolution) pour la résolution du problème de routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Le premier protocole SDERP (Stable-aware differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks) [24] s'inspire du protocole réactif AOMDV (Ad hoc On demand Multipath Distance Vector) qui est un protocole multi-chemins permettant de trouver des chemins à la demande par l'inondation d'un message de broadcast dans le réseau jusqu'à atteindre la destination. Deux contraintes sont utilisées lors du choix du meilleur chemin entre la source et la destination : l'énergie des nœuds inclus dans les chemins découverts et la stabilité des liens qui constituent ces chemins. L'objectif du protocole suggéré est de déterminer le chemin qui offre une grande stabilité et une meilleure valeur énergétique. Le processus d'évolution différentielle est exécuté après la fin de la découverte des chemins, c'est-à-dire au niveau du nœud source. Les nouveaux chemins générés par le processus d'évolution différentielle seront classés de manière décroissante selon la fonction objective (fonction de fitness) qui combine la contrainte de stabilité et d'énergie. Le nœud source prend la décision de la sélection du chemin ayant la valeur la plus élevée pour le transfert des données (il symbolise le parcours le plus stable avec un meilleur niveau d'énergie). En cas de détection d'une rupture de chemin, un message d'erreur sera envoyé à la source qui se chargera d'éliminer le chemin défaillant, d'évaluer les chemins existants et de choisir celle la plus adaptée en fonction de la valeur de la fonction de fitness. SDERP optimise les performances des réseaux MANETs en termes de taux de livraison des paquets, d'overhead, de consommation d'énergie et de délai de bout en bout. Le deuxième protocole ES-RPDE (Energy aware and link-Stability Routing Protocol based on Differential Evolution for MANETs) [25] est une amélioration du protocole de routage SDERP, en se basant sur la contrainte d'énergie des nœuds et de stabilité des liens lors du choix du meilleur chemin, mais en appliquant la méthode d'évolution différentielle en cours de découverte des chemins, exactement au niveau de la destination. Une fois que le processus bio-inspiré se termine, la destination transmet tous les nouveaux chemins valides au nœud source, qui sera chargé de sélectionner le meilleur chemin pour la transmission des données. Le protocole ES-RPDE entraîne une augmentation notable du taux de paquets reçus et une réduction du nombre de messages de contrôle dans les réseaux MANETs.
- Notre deuxième contribution consiste en un protocole de routage pour les réseaux FANETs, à savoir SE-RPCS (Energy aware and Stability multipath routing protocol Based on the cuckoo search algorithm for FANETs)[26]. SE-RPCS est un protocole de routage réactif multi-chemins spécialement conçu pour une utilisation de nœuds volants (drones) en trois dimensions (3D). Il intègre la méta-heuristique bio-inspirée recherche coucou (CS) pour trouver les meilleurs chemins entre le drone source et le drone de destination afin d'améliorer les performances du réseau. Le drone source choisit le meilleur chemin en s'appuyant sur une fonction objective qui se base sur la contrainte d'énergie des drones et de stabilité des liens constituant ces chemins. L'évaluation

des performances indiquent que le protocole SE-RPCS améliore les performances du réseau, tout en offrant plus d'efficacité et de fiabilité.

- Notre dernière contribution consiste en une proposition d'un protocole de routage DERP (Differential Evolution based Routing Protocol for Wireless Body Areas Networks) pour les réseaux corporels sans fil (WBANs)[27]. Cette solution de routage est basée sur l'algorithme bio-inspiré évolution différentielle pour trouver le chemin optimal d'un nœud source à un nœud de destination. L'objectif principal de ce protocole est de choisir le chemin qui garantit une consommation d'énergie minimale en privilégiant des liaisons stables. Cet algorithme introduit un modèle objectif basé sur l'efficacité énergétique des nœuds et la stabilité des liens afin d'évaluer les chemins valides. La stabilité de lien est estimée en fonction du comportement mobile des nœuds afin d'éviter les pannes de liaison dues à la mobilité du corps, ce qui prolonge la durée de vie du lien. En utilisant l'outil de simulation, les résultats de l'évaluation ont montré que le protocole DERP améliore les performances du réseau et offre plus de fiabilité par rapport à d'autres protocoles.

1.6 Organisation du manuscrit

Le travail réalisé dans ce manuscrit est débuté par une introduction générale et structuré en deux parties : La première partie est organisée en trois chapitres qui se concentrent sur les concepts fondamentaux et l'état de l'art, tandis que la seconde est organisée en trois chapitres qui mettent en avant nos contributions. Nous achevons ce manuscrit par une conclusion générale.

- **Chapitre 1: Introduction générale**

Nous exposons dans le premier chapitre le cadre général de notre thèse, en abordant le contexte des réseaux sans fil, en particulier les réseaux MANETs. Ce chapitre expose également la problématique étudiée ainsi que nos principales contributions.

- **Chapitre 2: Routage dans les réseaux MANETs**

Dans le deuxième chapitre, nous examinons en détail le processus de routage dans les réseaux MANETs, en mettant un accent particulier sur le routage multi-chemins. Ce dernier est abordé à travers ses concepts fondamentaux, ses objectifs, ainsi qu'une présentation des principaux protocoles existants dans ce domaine. Par ailleurs, nous proposons une classification des différentes contraintes qui influencent le routage dans les MANETs, notamment celles liées à l'énergie résiduelle, à la stabilité des liens et à la qualité des liens.

- **Chapitre 3: Méthodes bio-inspirées**

Dans le troisième chapitre, nous introduisons les méthodes bio-inspirées pour l'optimisation des problèmes en listant les diverses catégories de ces méthodes. Pour chaque catégorie, nous détaillerons quelques méthodes bio-inspirées les plus utilisées, leur déroulement ainsi que leurs fonctions et composants principaux.

- **Chapitre 4: Routage à base des méthodes bio-inspirées dans les réseaux MANETs**

Le quatrième chapitre se concentre sur les méthodes bio-inspirées implémentées pour résoudre le problème de routage dans les réseaux MANETs, au cours duquel nous examinons quelques protocoles de routage à base des techniques bio-inspirées issues de la littérature qui cherchent à résoudre ce problème. Nous finissons ce chapitre par une analyse comparative entre ces protocoles basée sur des métriques de performance.

- **Chapitre 5: Protocoles de routage multi-chemins SDERP et ES-RPDE**

Le cinquième chapitre met en évidence la suggestion de deux solutions de routage basées sur la méthode bio-inspirées évolution différentielle pour les réseaux MANETs. Nous présenterons les simulations qui ont été réalisées sous NS2.

- **Chapitre 6: Protocole de routage multi-chemins SE-RPCS**

Le sixième chapitre se focalise sur l'élaboration d'un nouveau protocole de routage inspiré par

la méta-heuristique de recherche coucou pour les réseaux FANETs, ainsi que sur chaque phase du développement de cette contribution.

- **Chapitre 7: Protocole de routage multi-chemins DERP**

Le dernier chapitre de la deuxième partie détaille la proposition d'un protocole de routage multi-chemins basé sur la méthode bio-inspirée évolution différentielle pour les réseaux WBANs. L'approche de cette contribution ainsi que les simulations réalisées à l'aide de l'outil NS-2 (Network Simulator 2) ont été exposées.

- **Chapitre 8: Conclusion**

Nous clôturons le manuscrit par une conclusion générale dans laquelle nous analysons les performances de nos protocoles de routage proposés et nous discutons les avantages et les limites de notre travail. Nous proposons aussi une discussion sur les pistes d'amélioration et d'adaptation de notre travail pour de futurs travaux de recherche sur le routage dans les réseaux sans fil.

1.7 Liste des publications

Les contributions de cette thèse ont fait l'objet de deux journaux soumis dans des revues internationales et de deux articles de conférences internationales publiés dans IEEE et Springer.

Articles de Revues Internationales

1. Mekkaoui Abdelkader, Smail Omar, et Rebbah Mohammed : SDERP : Stable-aware differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks. *International Journal of Communication Systems*, 2025, vol. 38, no 4, p. e6000.
2. Smail Omar, Soltani Kaouther et Mekkaoui Abdelkader : "DERP : Differential Evolution Based Routing Protocol for Wireless Body Area Networks. *Journal of Information Science and Engineering*, , 2025, vol. 41, no 3, p. 613-625.

Articles de Conférences Internationales

1. Mekkaoui Abdelkader, Smail Omar, et Rebbah Mohammed : Energy Aware and Link-Stability Routing Protocol Based on Differential Evolution for MANETs. In : *2024 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. IEEE, 2024. p. 66-71.
2. Mekkaoui Abdelkader, Smail Omar, et Rebbah Mohammed : Energy Aware and Stability Multipath Routing Protocol Based on the Cuckoo Search Algorithm for FANETs. In : *International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*. Springer Nature Switzerland, 2024. p. 493-503.

partie I

État de l'art et travaux connexes

Chapitre 2

Routage dans les réseaux MANETs

Contents

2.1	Introduction	15
2.2	Le routage dans les réseaux MANETs	16
2.2.1	Problématique de routage dans les réseaux MANETs	16
2.2.2	Conception des stratégies de routage	16
2.2.3	Taxonomie des protocoles de routage	17
2.3	Routage multi-chemins dans les réseaux MANETs	22
2.3.1	Concept et objectifs du routage multi-chemins	22
2.3.2	Les différents types de chemins multiples	24
2.3.3	Présentation des principaux protocoles de routage multi-chemins dans les réseaux MANETs	25
2.4	Classification des contraintes liées au routage dans les réseaux MANETs	29
2.4.1	Méthodes d'obtention des informations liées au calcul des contraintes de routage	30
2.4.2	Approches basées sur la mesure d'énergie	30
2.4.3	Approches basées sur la mesure de la stabilité des liens	34
2.4.4	Approches basées sur la mesure de la qualité des liens	38
2.4.5	Approches basées sur la mesure de plusieurs contraintes	41
2.5	Conclusion	41

2.1 Introduction

Grâce à l'évolution rapide de la technologie de télécommunication sans fil, il est maintenant possible de manipuler l'information à l'aide d'unités de calcul mobiles. Ces appareils présentent des spécificités telles que : la limitation de la capacité de stockage, une source d'énergie autonome et limitée, etc., et sont connectées au réseau via une interface de communication sans fil.

Un réseau MANET (réseau ad hoc) est un réseau constitué d'un ensemble de nœuds mobiles qui se déplacent de manière autonome et coopérative dans un espace donné, sans recourir à une infrastructure existante ou à une administration centralisée. La majorité des situations impliquent que l'unité destination ne se trouve pas nécessairement à proximité de l'unité source, ce qui signifie que l'échange de données entre deux nœuds différents doit être réalisé par des stations intermédiaires. La gestion de cette transmission de données, également appelée routage, nécessite la mise en place d'une architecture globale qui prend en considération la mobilité des nœuds et la flexibilité du média physique.

Le succès remarquable des réseaux MANETs est principalement attribuable à l'évolution constante des technologies sans fil, qui deviennent populaires et sont de plus en plus abordables en terme de coût. Ainsi, les appareils mobiles sont de plus en plus petits et performants en ce qui concerne la capacité de traitement et de stockage des données et ils sont équipés d'une variété de caractéristiques qui permettent de garantir diverses applications et services.

2.2 Le routage dans les réseaux MANETs

La réalisation des communications dans les réseaux MANETs est une tâche complexe. En effet, en l'absence d'infrastructure, il est difficile de transporter un paquet d'une source vers sa destination finale. Il s'agit de trouver un chemin entre les deux points qui va évoluer dans le temps et être découvert lors d'une prochaine enquête. En règle générale, le routage consiste à transmettre des informations vers la destination appropriée à travers un réseau de connexion spécifique. Il s'agit de mettre en place une stratégie qui assure à tout moment la création de chemins correctes et efficaces entre n'importe quel nœud du réseau, en assurant ainsi un échange continu des messages.

2.2.1 Problématique de routage dans les réseaux MANETs

Il est essentiel que le routage garantisse une stratégie pour transmettre les paquets de données à tout moment entre une paire d'hôtes (source et destination) à travers un réseau. La question du routage constitue l'une des principales préoccupations des communications radio à plusieurs sauts ([28] [29]).

Dans les réseaux MANETs, les hôtes mobiles sont contraints de gérer eux-mêmes le routage des données en raison de l'absence d'infrastructure dans ce type de réseau. Chaque hôte du réseau joue le rôle de relais lorsque la destination est en dehors de la portée radio de la source, en retransmettant les données vers un autre hôte jusqu'à arriver à la destination. La mobilité et les contraintes de ressources radio (limitation de la bande passante, débit variable, etc.) constituent des obstacles importants pour ce genre de routage.

Les protocoles de routage garantissent le flux de données d'un appareil mobile à un autre en utilisant des chemins multi-sauts. Les connexions radio évoluent de façon dynamique et régulière : les connexions se forment et se brisent en raison du déplacement libre des appareils mobiles. Les protocoles de routage s'ajustent en fonction de ces modifications de chemins. De plus, il est important qu'ils prennent en compte les limitations de ressources qui caractérisent les réseaux MANETs. Le protocole de routage doit garantir que les données soient routées à travers des chemins qui possèdent les ressources nécessaires, même si les chemins changent fréquemment.

2.2.2 Conception des stratégies de routage

La recherche et l'implémentation d'algorithmes de routage pour les réseaux MANETs dans le but de garantir la connexion des réseaux spécifiques représentent un défi complexe. L'environnement

change au fil du temps, ce qui entraîne des changements fréquents dans la topologie du réseau. Il semble donc essentiel que toute mise en œuvre de protocole de routage doit prendre en compte les problèmes suivants :

- **Réduire la charge du réseau** : l'amélioration des ressources du réseau comporte deux autres défis : éviter les boucles de routage et réduire la concentration du trafic autour de certains liens et hôtes.
- **Garantir un routage parfait** : il est essentiel que la stratégie de routage établisse des chemins optimaux et prenne en considération diverses contraintes de coûts telles que le nombre de sauts, l'énergie des nœuds, la stabilité des liens, la qualité des liens, etc.
- **Proposer un canal afin de pouvoir réaliser des échanges de données multi-points fiables** : L'évolution des chemins utilisés pour gérer les paquets de données ne devrait pas entraîner d'incidents dans le bon déplacement des données. La suppression d'un lien, que ce soit en raison d'une panne ou d'une mobilité, devrait, dans l'idéal, réduire au minimum les temps de latence.

2.2.3 Taxonomie des protocoles de routage

L'objectif principal de toute stratégie de routage consiste à mettre en place une méthode de gestion d'acheminement solide et performante (voir Figure 2.1). Une première classification consiste à classer les protocoles de routage selon la conception du réseau et les fonctions assignées à leurs hôtes ; une structure plate implique que tous les hôtes ont des niveaux équivalents, ou une structure hiérarchique implique que tous les hôtes n'ont pas le même niveau [30]. Une deuxième classification est obtenue en fonction de la méthode de construction et de maintenance des chemins pour le transfert des données : proactif, réactif et hybride [31]. Les protocoles proactifs offrent une vision globale de la topologie du réseau à chaque hôte en échangeant régulièrement les messages de la table de routage entre les hôtes, même s'il n'y a pas d'envoi de paquets de données en file d'attente. Les protocoles réactifs offrent la possibilité de trouver les chemins à la demande, en inondant des messages de découverte pour atteindre une destination. Les protocoles hybrides rassemblent les deux types de réseaux précédents, habituellement en utilisant le principe de zone. Dans ce qui suit, nous présentons quelques protocoles de routage qui ont été standardisés par le groupe de travail de l'Internet Engineering Task Force (IETF).

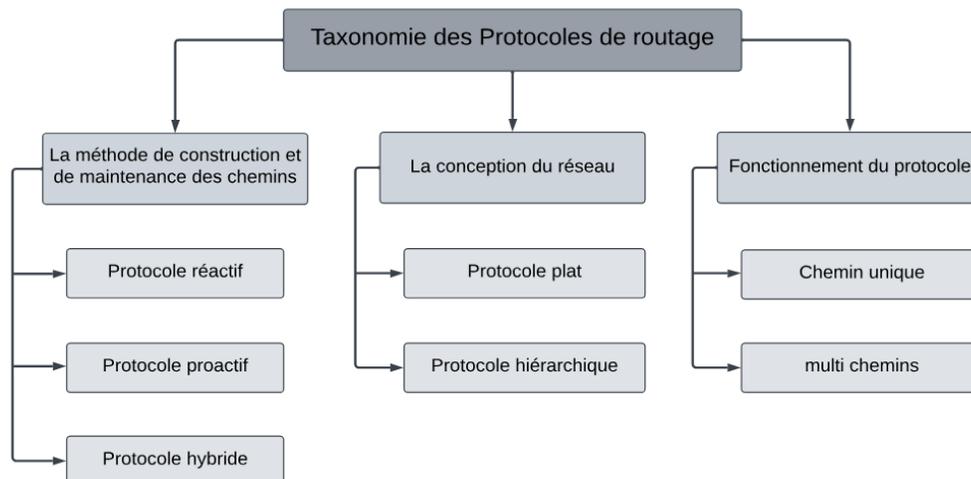


FIG. 2.1 – Taxonomie des protocoles de routage.

2.2.3.1 Classification selon la méthode de construction et de maintenance des chemins

2.2.3.1.1 Les protocoles proactifs Les protocoles de routage proactifs envoient régulièrement des messages de contrôle afin de créer, entretenir et mettre à jour les chemins, tout en transmettant simultanément les données. Malgré l'absence de trafic, cette maintenance demeure toujours en cours. Les protocoles implémentés de cette classe s'inspirent des deux techniques employées pour l'implémentation des protocoles dans les réseaux filaires : technique à état de Liens (link state) et technique à vecteur de distances (distance vector). Ces deux techniques reposent sur l'algorithme de plus court chemin [32].

- **La technique à état de liens (link state)** : selon cette méthode, chaque nœud conserve sa propre perception de l'ensemble de la topologie du réseau. Cette vision est mise à jour en diffusant régulièrement (par inondation) des demandes de chaque nœud déclarant l'état des liens de ses voisins à tous les nœuds du réseau. Il est également possible de procéder à la mise à jour lors du changement de l'état des liens. Après avoir effectué cette mise à jour, chaque nœud modifie sa perception de la topologie en se basant sur l'image complète du réseau composé des liens les plus récents. Par la suite, il utilise un algorithme de calcul de chemin optimal afin de déterminer la distance qui le sépare d'une destination spécifique. L'algorithme Dijkstra [33] est l'un des algorithmes les plus fréquemment utilisés pour calculer des chemins plus courts. Le protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) est un protocole proactif basé sur la technique à état de lien [34].
- **La technique du vecteur de distances (distance vector)** : En revanche, selon cette approche, chaque nœud communique à ses voisins sa perception des distances qui le séparent de tous les hôtes du réseau. Tous les nœuds calculent le meilleur chemin vers n'importe quelle destination en se référant aux informations reçues par tous leurs voisins. Cette technique repose sur le modèle distribué de Bellman-Ford (BF) [35]. Le calcul de la plus courte distance se répète jusqu'à ce que le réseau soit stable. Le protocole de routage DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Protocol) est l'un des premiers protocoles de routage proactifs de type vecteur de distance employés dans les réseaux MANETs [36].

2.2.3.1.2 Les protocoles réactifs Contrairement au protocole de routage proactif qui conserve la table de routage à tout moment en garantissant des chemins vers tous les nœuds accessibles grâce à l'échange régulier des messages de contrôle, même s'ils ne sont jamais utilisés. Le routage réactif (connu sous le nom à la demande) établit les chemins à la demande en utilisant la notion de requête-réponse. Il ne conserve que les chemins actifs pour réduire la consommation de bande passante. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer des données vers un nœud de destination et qu'il ne trouve aucun chemin disponible, il déclenche un processus de découverte des chemins en envoyant un message de requête à tous les nœuds voisins, qui le retransmettent jusqu'au nœud de destination. Après avoir reçu la requête par le nœud de destination, il répond au nœud source qui entame la transmission de données dès qu'il reçoit la réponse. Les chemins sont restaurés par une opération de maintenance en cas de coupure des liens. Chaque nœud inclus dans le réseau commence à échanger régulièrement des messages Hello afin de vérifier la relation avec ses nœuds voisins.

Selon la méthode de découverte des chemins utilisée, on distingue deux catégories de protocoles de routage à la demande [14] :

- **Le routage source (source routing)** : pendant la découverte, la requête regroupe la série des nœuds intermédiaires jusqu'à atteindre le nœud de destination. Lorsque le message de réponse parvient au nœud source, il inclut la liste des adresses des nœuds qui constituent le chemin trouvé à partir du nœud source jusqu'à la destination. De cette manière, cette liste est incluse dans les paquets de données et elle est directement transmise par les nœuds intermédiaires en

utilisant ces informations, sans nécessiter de maintenir la table de routage. Le DSR (Dynamic Source Routing) est un protocole de routage réactif qui utilise la méthode de routage à source afin d'acheminer les paquets de données [37].

- **Le routage saut par saut (hop by hop) :** aussi connu sous le nom d'apprentissage en arrière, les paquets de données et les messages de contrôle ne contiennent que l'adresse de destination principale. La transmission des données se fait en maintenant les chemins dans la table de routage à chaque nœud. Lors de la découverte, les nœuds intermédiaires sauvegardent les chemins inverses (vers la source) avant de rediffuser le paquet de requête en broadcast pour qu'il puisse envoyer la réponse en utilisant ce chemin ultérieurement. On procède de la même manière lorsqu'un nœud reçoit la réponse tout en continuant le chemin vers la destination.

Le routage réactif permet de diminuer le nombre de messages de contrôle générés, car il ne lance aucun message que lorsque nécessaire. Il a pour objectif de maintenir uniquement les chemins actifs et non tous les nœuds du réseau. Cependant, il existe un délai de rétablissement de la communication en raison du processus de découverte, où le nœud source doit attendre une réponse avant de commencer le transfert des paquets de données [15]. Un autre inconvénient réside dans la quantité de trafic lors de l'opération de découverte, ce qui entraîne une surcharge du réseau. Dans ce qui suit, nous détaillerons le fonctionnement du protocole de routage réactif AODV qui emploie la méthode de routage saut par saut.

Le protocole de routage AODV Le protocole AODV (en anglais : Ad hoc On-demand Distance Vector) est un protocole réactif unicast qui utilise des messages de type requête et réponse. Il repose sur deux mécanismes : la découverte et la maintenance. Le protocole AODV utilise le principe de routage saut par saut lors de la découverte de chemins. Le protocole AODV est une version améliorée du protocole DSDV qui utilise une table de routage à vecteur de distance par numéro de séquence, en utilisant le principe à la demande [38].

Chaque nœud maintient sa table de routage qui comprend : le nœud destination, le nœud suivant, le nombre de sauts, le numéro de séquence, le temps d'expiration. Par ailleurs, chaque nœud qui dispose d'un chemin actif envoie régulièrement un message Hello afin de vérifier la connectivité [39].

1. **Le processus de découverte des chemins :** Ce processus est déclenché lorsque l'un des nœuds souhaite envoyer des paquets de données à un autre nœud qui n'a pas de chemin actif. Le nœud source envoie une requête de type RREQ à tous ses nœuds adjacents en lui attribuant une valeur de diffusion (appelée Broadcast_ID) et en initialisant celle du nombre de sauts (NBR_sauts) par 0. La structure du message RREQ est illustrée dans la Figure 2.2 . Lorsqu'un message RREQ est reçu par un nœud intermédiaire, il vérifie si le RREQ a déjà été reçu auparavant (en utilisant le champ Broadcast_ID). Si ce nœud est le premier RREQ et n'a pas de chemin vers la destination, il sauvegarde le chemin inverse (vers le nœud source) dans la table de routage et incrémente le champ hopcount, puis renvoie la requête. Les requêtes dupliquées ne seront pas prises en compte. Le retour de réponse (RREP) est effectué soit par un nœud intermédiaire s'il dispose d'un chemin vers la destination, soit si la destination est atteinte. Les nœuds intermédiaires enregistrent le message RREP retourné en utilisant le chemin inverse et conservent également le chemin vers la destination pendant le passage du message RREP dans leurs tables de routage. Lorsqu'un nœud reçoit une réponse RREP, il la transmet immédiatement. Si d'autres réponses sont fournies, il actualisera sa table de routage et transmettra ce message uniquement si ce message présente un numéro de séquence élevé (un chemin plus fraîche) ou un nombre de sauts réduit. Finalement, lorsque le nœud source recevra la première requête RREP, il commencera directement la transmission des données vers sa destination. AODV adopte le même concept de numéro de séquence que DSDV pour éviter la boucle de routage. Lors de la réception d'autres requêtes RREPs par la source, elle met à jour sa table de routage et choisit le meilleur chemin

(le plus rapide en termes de nombre de sauts) [39].

SRC_ID	N°_SEQ_SRC	DST_ID	N°_SEQ_DST	Broadcast_ID	NBR_sauts
--------	------------	--------	------------	--------------	-----------

FIG. 2.2 – Structure du paquet RREQ du protocole AODV.

Lorsque le nœud source transmet une demande de découverte, il initialise un délai d'attente (appelé RREP_WAIT_TIME). Si la destination n'est pas accessible, le nœud source ne recevra aucune réponse malgré l'expiration du délai ; un nouvel processus de découverte sera lancé. En outre, pour éviter les surcharges du réseau par l'envoi des messages de diffusion par les nœuds inaccessibles, le protocole AODV établit un nombre d'essais restreint appelé RREQ_RETRIES. Lorsque le nombre de découvertes dépasse ce chiffre sans obtenir de réponse, le nœud source considère cette destination comme inaccessible et suspend la découverte pour ce nœud pendant une période déterminée. Le processus de découverte du protocole AODV est illustré par un exemple dans la Figure 2.3 .

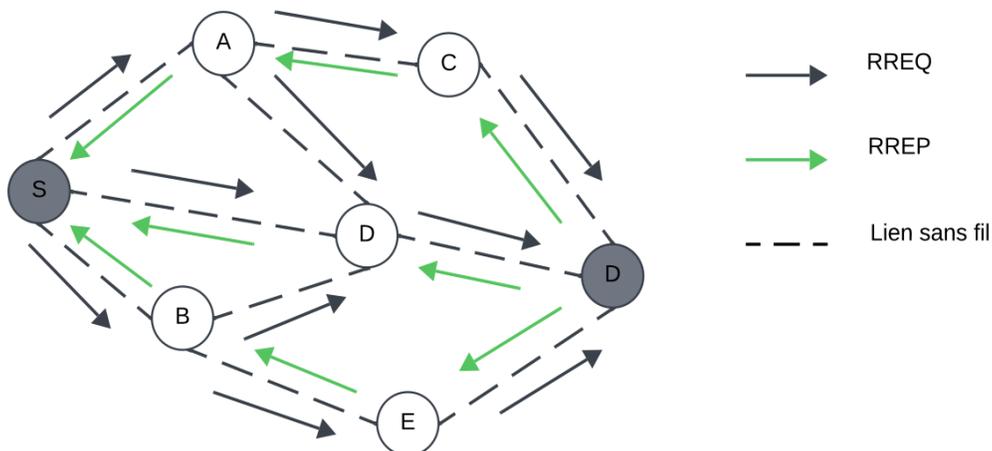


FIG. 2.3 – Processus de découverte des chemins (AODV).

- Le processus de maintenance des chemins :** Dans le protocole AODV, chaque nœud conserve la liste des voisins en échangeant régulièrement des messages de type Hello pour garantir la connectivité et détecter la coupure des liens. Lorsqu'un nœud ne reçoit aucun message de type Hello d'un voisin après un certain temps pour un chemin actif (un paramètre est utilisé, appelé `allowed_hello_loss`, qui représente le nombre de messages Hello consécutifs perdus pour signaler que ce lien devient invalide), ce lien sera considéré comme perdu. Si un nœud intermédiaire détecte une interruption pendant la transmission de données, il élimine les chemins actifs qui utilisent le lien coupé. Il envoie ensuite un message d'erreur RERR à la source qui contient ce lien afin de lui signaler que la destination devient inaccessible. La transmission de ce message se fera en utilisant le chemin inverse à travers les nœuds intermédiaires pour atteindre la source. Après avoir reçu le message d'erreur par la source, elle élimine le chemin en question et relance le processus de découverte.

L'AODV, tout comme la plupart des protocoles réactifs, entraîne une grande quantité de contrôle lors de l'opération de découverte et même lors de la maintenance en raison des interruptions des passages. Effectivement, dans un contexte de mobilité élevée, la découverte sera réalisée de manière très régulière, ce qui entraîne une utilisation excessive des ressources du réseau.

2.2.3.1.3 Les protocoles hybrides Un protocole de routage hybride combine les deux protocoles, à savoir le protocole proactif et le protocole réactif, en tirant parti des bénéfices de ces deux types. Il est de plus en plus adapté aux réseaux de grande envergure (mise à l'échelle) [40]. Les protocoles hybrides reposent sur l'organisation du réseau en zones, où ils utilisent le principe de routage proactif à l'intérieur de chaque zone (communication instantanée) et le routage à la demande (réactif) à l'extérieur de chaque zone :

- **Intra-zone** : lorsqu'un nœud souhaite interagir avec un autre nœud situé dans la même zone, il utilisera un routage proactif (localement) pour réduire les coûts (la taille de la table de routage ainsi que le volume du flux constant).
- **Inter-zone** : lorsqu'un nœud souhaite établir une communication avec un autre nœud situé en dehors de la zone locale, un routage réactif sera employé pour restreindre l'envoi massif de messages de contrôle lors de la découverte des chemins.

Le ZRP (Zone Routing Protocol) [41] [42] est l'un des protocoles de routage hybrides qui permet de diviser le réseau en différentes zones (connues sous le nom de zones de routage). La création d'une zone autour de chaque nœud, indépendamment des autres, sera représentée par l'ensemble des nœuds situés dans un rayon préétabli. Le rayon dans ZRP correspond au nombre de sauts (ZRP définit la valeur à deux sauts) et non pas à la distance. On utilise un routage proactif à l'intérieur de la zone, ce qui entraînera la création d'un schéma local de la zone au niveau du nœud. L'utilisation d'un protocole réactif est nécessaire lorsque le nœud source souhaite communiquer avec un nœud qui ne se trouve pas dans sa zone (inter-zone) [43]. Le protocole ZRP convient davantage pour la transition vers l'échelle. La performance du protocole de routage ZRP est influencée par la valeur de rayon sélectionnée ; si la valeur est très faible, il sera totalement réactif dans le routage.

En conclusion, le Tableau 2.1 présente une analyse comparative entre les trois différentes catégories des protocoles de routage [44] [45] :

Caractéristiques	Proactif	Réactif	hybride
Organisation du réseau	Plat	Plat	Hiérarchique
Diffusion de la topologie	Périodique	À la demande	Périodique / À la demande
Gestion de la mobilité	Toujours Disponible	Disponible en cas de besoin	Les deux
Latence des chemins	Mises à jour périodiques	Maintenance des chemins	Les deux
Surcharge de communication	Élevé	Faible	Moyen

TAB. 2.1 – Analyse comparative entre les protocoles proactif, réactif et hybride.

2.2.3.2 Classification selon la conception du réseau

2.2.3.2.1 Protocole de routage à architecture plate : Les protocoles de routage plats implémentés dans les réseaux MANETs permettent la communication entre nœuds sans infrastruc-

ture ou hiérarchie ; les nœuds ayant le même niveau et le même rôle (nœuds ordinaires). La plupart des protocoles réactifs et proactifs sont de type plat, comme AODV, DSR, DSDV et OLSR.

2.2.3.2.2 Protocole de routage à architecture hiérarchique : À la différence de la méthode de routage à plat, le routage hiérarchique, comme son nom l'indique, est un routage à plusieurs niveaux, où les nœuds d'un réseau n'ont pas le même rôle. Dans ce type de routage, les nœuds sont répartis en groupes (connus sous le nom de clusters) qui sont géographiquement proches. Chaque groupe est dirigé par un responsable du cluster « cluster-head » qui coordonne tous les échanges de son groupe [46]. Le premier niveau est l'ensemble des nœuds qui ne sont pas des responsables de groupes, et le deuxième niveau est représenté par les chefs de groupe (niveau supérieur). Les concepts fondamentaux [47] sont décrits ci-dessous :

- **Le clustering :** est une méthode employée afin de séparer le réseau en différents groupes (clusters) en fonction de certains critères tels que l'énergie des nœuds, la mobilité des nœuds, etc. Tous les groupes choisissent un chef de groupe (cluster-head) qui assure la gestion de la communication au sein de leur groupe et avec les autres groupes.
- **Un cluster :** est un groupe formé par un ensemble de nœuds. Il est possible que le groupe soit à un seul saut (one-hop cluster) ou à plusieurs sauts (k-hops), avec une distance minimale de n'importe quel nœud de ce groupe vers le chef du groupe (en termes de nombre de sauts).
- **Le cluster-head :** est le responsable du groupe. Il assure la communication à l'intérieur du groupe (intra-cluster) et avec les autres groupes en utilisant des nœuds passerelles (inter-cluster). Il a la charge de diverses responsabilités telles que : le routage, la maintenance des groupes, etc.
- **Cluster-gateway :** il s'agit de la passerelle. Il s'agit d'un nœud qui se trouve au bord d'un groupe et joue le rôle d'un nœud commun qui permet la communication entre deux cluster-head ou plus.

Pour résoudre le problème de scalabilité, on peut utiliser un routage hiérarchique qui divise le réseau en groupes afin de faciliter la manipulation et de réduire le flux de contrôle. Toutefois, le changement fréquent des cluster heads a un impact significatif sur les performances des réseaux en raison de la perte des données de routage. HSR (Hierarchical State Routing) est un protocole hiérarchique développé afin d'améliorer l'évolutivité du réseau sans fil en l'organisant en une hiérarchie multi-niveaux et de prolonger sa durée de vie [48].

2.3 Routage multi-chemins dans les réseaux MANETs

2.3.1 Concept et objectifs du routage multi-chemins

Comme nous l'avons mentionné précédemment, divers protocoles de routage à chemin unique ont été suggérés pour trouver un chemin entre le nœud source et le nœud destination, afin de garantir une bonne transmission des données dans un réseau MANET. En raison de la nature dynamique de ces réseaux (exemple : contrainte d'énergie, bande passante, etc.), il est possible que les liens soient fréquemment rompus, ce qui entraîne un nouveau processus de découverte des chemins. En outre, il ne garantit aucun équilibrage de charge lorsque certains nœuds peuvent être plus impliqués dans le routage que d'autres, ce qui entraîne une congestion de liens et un épuisement rapide d'énergie des nœuds. Dans cette situation, l'idée de routage multi-chemins est apparue afin de favoriser la recherche de différents chemins.

Une méthode de routage multi-chemins consiste à trouver non pas un seul chemin entre une source et une destination, mais plusieurs chemins en offrant au nœud source de nombreux choix pour sélectionner le meilleur chemin. Les chemins découverts peuvent être utilisés simultanément par la

technique de partage des paquets de données sur ces chemins trouvés en même temps ou alternativement ([5] [16]), sinon en choisissant le meilleur chemin (le chemin optimal) pour transmettre les données ; les autres chemins seront considérés comme des solutions alternatives. Le routage multi-chemins vise à atteindre divers objectifs, notamment la gestion du réseau. Ce type de routage offre plusieurs avantages [14] [49], nous citons :

- **Fiabilité** : En raison des changements fréquents de la topologie des réseaux MANETs ainsi que des interférences, la fiabilité représente un défi majeur dans tels réseaux. C'est la probabilité qu'un paquet de donnée envoyé parvienne à sa destination. Il est crucial de garantir la sécurité des paquets dans les réseaux MANETs grâce aux protocoles de routage, car cela peut entraîner des pertes. Le routage multi-chemins vise principalement à améliorer la fiabilité et à garantir un équilibrage de charge. L'utilisation du routage multi-chemins permet de résoudre les problèmes de perte de données en transmettant une copie du même paquet dans chaque chemin disponible (ce qui est rarement utilisé pour préserver les ressources du réseau) ou en partageant les paquets de données sur ces chemins, ce qui implique que si une coupure survient, seuls les paquets transmis à travers ce chemin sont perdus.
- **Distribution de charge** : L'équilibrage de la charge joue un rôle crucial dans les réseaux MANETs. L'usage d'un routage multi-chemins permet de répartir le flux de transmission des données sur plusieurs chemins découverts, ce qui permet de diminuer la congestion, d'augmenter la bande passante (en utilisant simultanément plusieurs chemins) et d'optimiser l'utilisation des ressources.
- **Consommation d'énergie** : Les nœuds des réseaux MANETs sont fortement dépendants de leurs batteries qui ont une énergie restreinte. L'épuisement de la batterie d'un nœud a un impact sur la topologie du réseau, sa durée de vie et son fonctionnement. Le routage multi-chemins vise à sélectionner le meilleur chemin parmi ceux découverts afin de minimiser l'énergie consommée par le réseau [50]. L'inconvénient de ces protocoles réside dans le fait que les nœuds sélectionnés pour le chemin consommeront rapidement leur énergie. À cet effet, la pratique du routage multi-chemins a démontré son efficacité dans la répartition de la charge parmi les nœuds en fonction de leur énergie résiduelle. De cette façon, lorsque la consommation d'énergie est équilibrée entre les nœuds, cela permet d'améliorer considérablement la durée de vie du réseau [51].
- **Réduire les surcoûts** : La réduction des coûts supplémentaires liés aux paquets de contrôle et à leur traitement générés par le routage est un autre avantage du routage multi-chemins. Chacune des trois classes de protocoles de routage a ses propres stratégies pour réduire les surcoûts dans les réseaux MANETs [52] [53], que ce soit par la réduction du trafic de contrôle, l'optimisation de l'énergie ou la réduction de la latence. En choisissant le protocole approprié en fonction du contexte d'utilisation, on peut maximiser l'efficacité des communications dans ces réseaux dynamiques.
- **Tolérance aux erreurs** : Il est possible de réduire les effets des coupures de chemins en utilisant un routage multi-chemins. Si une coupure est détectée, le nœud source dispose déjà d'autres chemins vers la destination, donc au lieu de déclencher une nouvelle découverte (comme c'est le cas dans un routage à chemin unique), il utilise un chemin alternatif déjà existant. Cela évitera le temps de latence (temps nécessaire pour obtenir une réponse lors de la nouvelle découverte) et diminuera le flux des messages de contrôle.

Le routage à plusieurs chemins repose sur trois étapes [49] :

- **Découverte des chemins** : il s'agit du processus de recherche des différents chemins.
- **Maintenance des chemins** : il s'agit du processus de réparation des chemins qui se détériorent.
- **Allocation du trafic** : c'est la stratégie qui est responsable de la répartition des paquets de données sur les chemins découverts.

2.3.2 Les différents types de chemins multiples

L'emploi de différents chemins réduit l'impact des ruptures de liens. Cela joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances des réseaux. Le routage multi-chemins demeure une méthode plus complexe que le routage à un seul chemin. Sa difficulté réside dans la découverte des différents chemins. Trois méthodes permettent de construire des chemins multiples dans un réseau en évitant les boucles de routage et en garantissant l'autonomie des chemins (afin d'éviter qu'une interruption d'un chemin ne suscite d'autres chemins) :

- **Chemins à nœuds disjoints** : est un ensemble de chemins reliant une source à une destination, sans partage de nœud intermédiaire entre ces chemins. Cela implique qu'en cas d'échec d'un des chemins (par exemple, en raison de la défaillance d'un nœud), les autres chemins peuvent encore servir à maintenir la communication (voir Figure 2.4 A).
- **Chemins à liens disjoints** : est un ensemble de chemins qui relient une source à une destination, sans lien (c'est-à-dire, sans connexion entre deux nœuds) entre ces chemins. Cela implique que bien que les nœuds puissent être identiques, les liens entre eux peuvent différer (voir Figure 2.4 B).

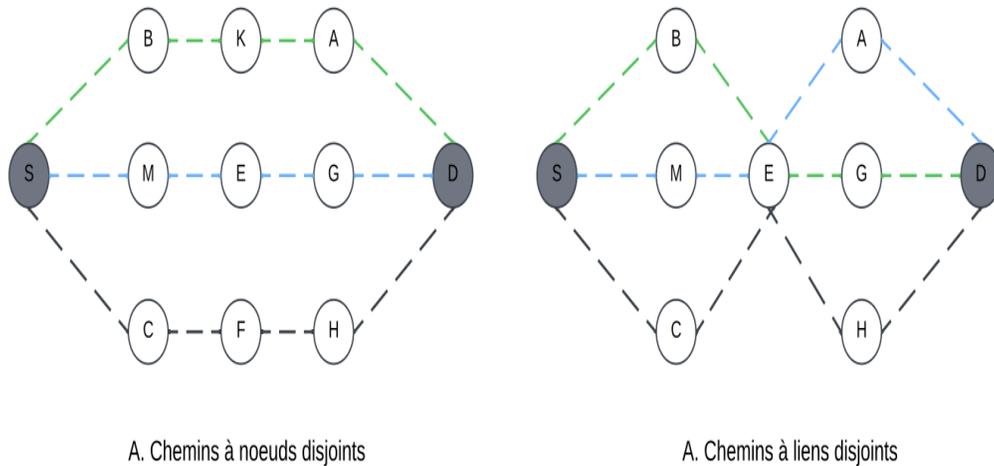


FIG. 2.4 – Types de chemins multiples.

- **Chemin à liens partiellement disjoints** : est un chemin qui peut partager quelques nœuds ou liens. La performance du réseau est influencée par le type de chemins multiples à découvrir. Les chemins à nœuds disjoints présentent une fiabilité supérieure à celle des autres types, car les nœuds sont complètement disjoints. Alors, la rupture d'un chemin (en cas de défaillance d'un nœud ou la perte d'un lien) n'affecte pas les autres chemins qui peuvent être utilisés par la suite. Cependant, les chemins découverts sont moins nombreux et peuvent atteindre jusqu'à un seul chemin dans les réseaux à faible densité. Pour le deuxième type, les chemins à liens disjoints où les chemins partagent certains nœuds, ils ne sont pas affectés par la coupure d'un lien, mais la défaillance d'un nœud (par exemple, épuisement de la batterie) peut entraîner leur perte. La plupart des études actuelles utilisent l'un de ces deux types de chemins multiples, car ils augmentent la bande passante et réduisent les risques de pertes de données.

2.3.3 Présentation des principaux protocoles de routage multi-chemins dans les réseaux MANETs

Plusieurs protocoles de routage ont été suggérés pour intégrer le routage multi-chemins dans les réseaux MANETs. La plupart d'entre eux incluent des extensions qui améliorent le fonctionnement des protocoles de routage existants tels que AODV, DSDV et DSR. Dans cette partie, nous aborderons deux différents protocoles de routage multi-chemins tels que AOMDV [54] et MDSDV [49].

Le protocole de routage AOMDV

AOMDV (Ad hoc On-Demand Multipath Distance Vector) est une extension multi-chemins (multipath) du protocole de routage AODV, conçu pour les réseaux MANETs. Comme AODV, il s'agit d'un protocole de routage réactif multi-chemins, c'est-à-dire qu'il ne découvre des chemins qu'à la demande. Cependant, AOMDV améliore AODV en permettant la découverte et la gestion de plusieurs chemins alternatifs entre un nœud source et destination, ce qui le rend plus robuste face aux pannes de réseau et aux changements de topologie fréquents. Au fil du temps, la topologie du réseau change en raison de la mobilité des nœuds, ce qui entraînera la perte de certains chemins. Lors de cette situation, le protocole AODV doit initier une procédure de découverte des chemins afin de rétablir la communication. Le protocole AOMDV a pour but de garantir une tolérance efficace aux fautes en réagissant rapidement aux interruptions repérées en rétablissant la transmission sans nécessiter de nouvelle découverte. Il s'appuie sur le même concept d'AODV (processus de découverte des chemins et de maintenance des chemins) avec quelques améliorations pour intégrer le concept de routage multi-chemins en assurant des chemins à lien disjoint sans boucle. Lors de la même opération de découverte, le protocole AOMDV permet de repérer plusieurs chemins à liens disjoints et sans boucle entre un nœud source et un nœud destination. Cependant, il ne prend en compte que le chemin le plus efficace (en termes de nombre de sauts) jusqu'à ce qu'il devienne invalide suite à une coupure. Si tous les chemins découverts seront invalides, une nouvelle opération de découverte est nécessaire. Voici une explication détaillée sur le principe de fonctionnement du protocole AOMDV :

1. **Découverte multi-chemins :** Le processus de découverte du protocole AOMDV est semblable à celui de AODV, il conserve les mêmes règles d'AODV, mais avec des ajustements apportés à la structure de la table de routage et au message de contrôle afin de s'adapter au concept de multi-chemins à lien disjoint. Une nouvelle idée a été introduite dans la table de routage d'AOMDV pour maintenir des chemins sans boucle, appelée « advertised_hopcount », qui correspond au nombre maximal de sauts d'un nœud quelconque vers un nœud destination pour les chemins disponibles. Il n'est autorisé d'utiliser un chemin alternatif que si le nombre de sauts de ce chemin est inférieur ou égal à celui de « advertised_hopcount ».

En outre, un champ inédit appelé premier saut « First_Hop » est employé pour le paquet RREQ (qui correspond au premier nœud voisin de la source qui a envoyé le paquet) afin de garantir un chemin à liens disjoints et sans boucle. Les nœuds intermédiaires conservent une liste de premiers sauts « First_Hop » qui regroupe tous les nœuds les plus proches du nœud source à partir desquels une RREQ a été prise. La table de routage du protocole AOMDV est représentée dans la Figure 2.5.

Dans AOMDV, le processus de découverte des chemins débute en diffusant une requête de chemin de type RREQ par la source lorsqu'elle ne dispose pas d'un chemin valide vers la destination. Ces demandes sont reçues par chaque nœud intermédiaire et ne sont diffusées que si elles arrivent par des voies différentes, ce qui permet de découvrir plusieurs chemins sans boucle vers la destination. Lorsque les nœuds voisins reçoivent un paquet RREQ, ils ajoutent dans le champ First_Hop leur adresse. À la différence du protocole AODV qui ne prend pas en compte les RREQs dupliqués

Destination
Numéro de séquence
nbr_sauts_annoncés
Liste des routes <pre>{(prochain_saut1, nombre_saut1,); (prochain_saut2, nombre_saut2,);....}</pre>
Délai d'expiration

FIG. 2.5 – Structure de la table de routage (AOMDV).

au niveau des nœuds intermédiaires, les nœuds intermédiaires qui reçoivent ce type de paquets ne les suppriment pas immédiatement s'ils sont dupliqués, ils conservent la liste de `First_Hop` pour chaque RREQ pour s'assurer que le chemin est à lien disjoint. Il examine si le nœud du message RREQ reçu n'a pas encore été utilisé pour cette requête (il cherche s'il est inclus dans la liste `First_Hop`). Si tel est le cas, le nœud intermédiaire enregistre cette nouvelle adresse dans la liste des `First_Hop` et ajoute ensuite le chemin inverse vers le nœud source dans la table de routage.

Les nœuds intermédiaires ne diffusent qu'une seule copie de RREQ, mais ils prennent en charge tous les messages RREQs reçus. Dès qu'il reçoit un RREQ, il vérifie toujours s'il a un chemin vers la destination, et si c'est le cas, il répond immédiatement par un message de type RREP. La destination répond à un nombre spécifique de RREQs en passant par des nœuds uniques, dont chaque nœud définit un chemin à liens disjoints (c'est-à-dire qu'un message de RREP sera envoyé pour chaque nœud unique). Les RREPs utilisent les chemins inverses pour atteindre le nœud source. Chaque fois que les nœuds intermédiaires sont traversés, le chemin vers la destination est ajoutée à la table de routage. Le nœud source attend alors que les réponses de chemins RREP soient retournées via les différents chemins découverts, soit par les nœuds intermédiaires ou par la destination elle-même. Un délai `RREP_WAIT_TIME` est défini pour permettre à la source de recevoir plusieurs réponses avant de choisir ou d'utiliser les chemins disponibles. En cas d'expiration du délai d'attente et de non-réception des messages RREPs, le nœud source a la possibilité de rediffuser un nouveau message RREQ, de relancer le processus de découverte ou de déclarer l'échec de la tentative de découverte si aucun chemin valide n'est trouvé. Le processus de découverte du protocole AOMDV est décrit dans un exemple illustré dans la Figure 2.6.

Dans cet exemple, le nœud source (S) a identifié trois chemins à liens disjoints vers le nœud destination (D). Après l'expiration du temps d'attente de découverte, le nœud source sélectionne le chemin le plus court en termes de nombre de sauts (le chemin qui traverse le nœud B).

2. **Maintenance des chemins :** Dans les réseaux MANETs, la maintenance du protocole AOMDV repose sur la gestion proactive de différents chemins et la détection des interruptions de liaisons. Suite à l'implantation initiale de plusieurs chemins sans boucles grâce aux messages de type RREQ et RREP, le protocole AOMDV utilise des messages de type HELLO échangés régulièrement entre les nœuds voisins afin de contrôler la connectivité. Lorsqu'un nœud détecte une interruption avec son successeur sur un même chemin actif, il élimine le lien et augmente le numéro de séquence. Par la suite, il détecte tous les nœuds qui se retrouvent inaccessibles en raison de cette coupure, puis il produit un message d'erreur de type RERR contenant la liste des nœuds inaccessibles avec leur nouveau numéro de séquence. Tous les nœuds précédents qui utilisent ce chemin recevront le message RERR. Chacun d'eux examine également s'il existe d'autres nœuds

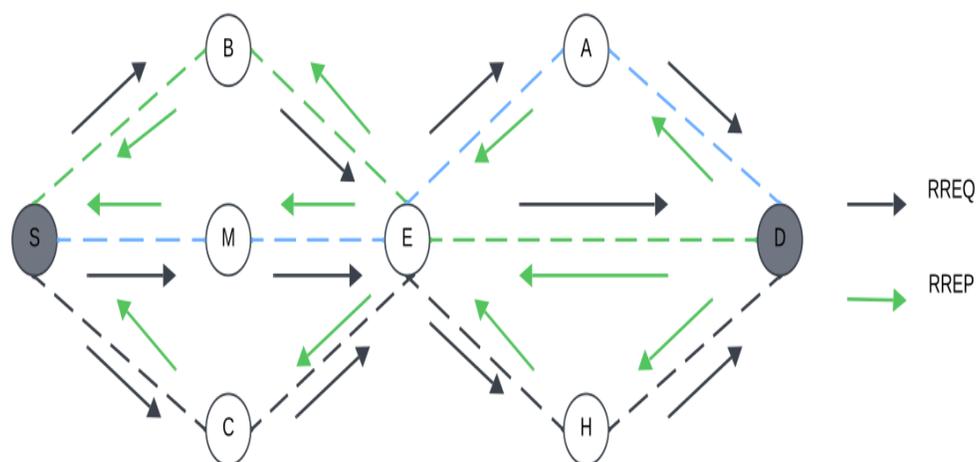


FIG. 2.6 – Exemple de processus de découverte des chemins (AOMDV).

qui deviennent inaccessibles et les intègre dans le message, ce message étant ensuite retransmis jusqu'à la source. Lorsque le nœud source reçoit un message RERR, il élimine les chemins associés et vérifie sa table de routage, il sélectionne immédiatement un chemin alternatif parmi ceux disponibles, sans nécessiter une nouvelle découverte des chemins, et reprend la transmission des paquets en fil d'attente. Ce système de basculement rapide améliore la fiabilité en diminuant les interruptions de transmission. Si tous les chemins échouent, un nouveau processus de découverte des chemins est initiée. Lorsqu'un nouveau chemin plus court est découvert, cette maintenance met également à jour les chemins, garantissant ainsi une optimisation continue des chemins actifs. L'utilisation du protocole AOMDV présente de nombreux avantages importants par rapport à AODV, notamment sa capacité à gérer différents chemins entre un nœud source et destination. À la différence d'AODV, qui ne conserve qu'un seul chemin actif, AOMDV conserve plusieurs chemins sans boucles, ce qui permet de passer rapidement à un autre chemin en cas de difficulté de lien, évitant ainsi de redécouvrir un nouveau chemin et réduisant les temps de latence. Ceci contribue à améliorer la fiabilité et la robustesse du réseau, notamment dans des environnements mobiles où les connexions sont souvent instables. En outre, en cas de panne, AOMDV réduit le trafic de contrôle, car il n'est pas requis de réémettre régulièrement des messages de découverte des chemins (RREQ/RREP) comme dans AODV, ce qui réduit la charge globale du réseau. En utilisant plusieurs chemins, le protocole permet également de répartir le trafic de manière plus efficace, évitant ainsi la surcharge d'un seul axe et diminuant les risques de congestion. Cela conduit à une utilisation plus efficace des ressources et à un échange de données plus fluide, avec moins de retard, en particulier dans les réseaux où la topologie varie souvent. Néanmoins, sa complexité est accrue par rapport au protocole AODV, en raison de la gestion des multiples chemins. Cette approche requiert davantage de ressources, en particulier en ce qui concerne la mémoire et le traitement, car chaque nœud doit gérer et surveiller plusieurs chemins. De plus, le trafic de contrôle est accru, avec des messages supplémentaires échangés pour surveiller l'état de chaque chemin, ce qui peut entraîner une surcharge du réseau et diminuer la capacité de la bande passante. Finalement, la gestion de plusieurs chemins peut parfois conduire à l'utilisation de chemins sous-optimaux ou à des incohérences dans les tables de routage, ce qui a un impact sur la performance globale du réseau.

Le protocole de routage MDSDV

Les protocoles proactifs créent et mettent à jour les chemins pour tous les nœuds du réseau en utilisant l'échange régulier d'informations de routage. MDSDV (Multipath Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector) est une adaptation multi-chemins du protocole proactif à vecteur de distance DSDV conçu pour les réseaux MANETs. Ce protocole cherche à construire des chemins multiples à nœuds disjoints afin d'augmenter la robustesse et la fiabilité du routage dans des réseaux où la connectivité est souvent perturbée. L'approche du MDSDV consiste à combiner la redondance et la variété des chemins afin d'améliorer la qualité des communications. Pour cela, deux nouveaux champs ont été ajoutés à la table de routage des nœuds par rapport à DSDV : `2eme_saut` et `Id_lien`. Le champ `Id_lien` est un numéro de référence unique pour chaque lien présent dans le chemin. Il permet de faire la distinction entre les divers liens du réseau, ce qui facilite l'identification des chemins lors des mises à jour de la table de routage. Chaque nœud assigne une `Id_lien` à chaque lien avec ses voisins. Ceci aide à déterminer le lien utilisé pour atteindre un nœud de destination précise, même si plusieurs chemins conduisent à cette destination.

À chaque nœud, une table de routage est conservée qui affiche le nombre de chemins vers chaque destination. Leur table de routage est régulièrement mise à jour par les nœuds. La figure 2.7 illustre la structure d'une entrée dans la table de routage. Chaque nœud diffuse un message de type HELLO de manière régulière en mode broadcast. Si nécessaire, les voisins qui reçoivent une telle requête ajoutent une nouvelle entrée liée à l'émetteur et envoient en unicast une information complète de leur table de routage via le message de type FULL DUMP au nœud qui a envoyé le message HELLO. Lorsque le nœud reçoit un message FULL DUMP, il entame la création de sa table de routage et attribue un identifiant au lien. Ensuite, il diffuse en mode broadcast une mise à jour en utilisant le message UPDATE. Après avoir reçu ce message, le nœud met à jour sa table de routage et le message UPDATE, puis envoie ce dernier à son tour en mode broadcast. À chaque fois qu'un nœud détecte une rupture de liaison, il envoie un message de type FAILURE en mode broadcast avec l'identifiant de la liaison associé au nœud inaccessible. Par la suite, il met à jour sa table de routage en éliminant les entrées qui utilisent ce nœud injoignable comme prochain saut.

Adr_destination
1 ^{er} _saut
2eme_saut
Nbr_sauts
Id_lien
Num_seq
Délai

FIG. 2.7 – Structure de la table de routage (MDSDV).

Dans la table de routage, chaque destination enregistre non seulement la distance et le numéro de séquence d'une entrée, mais également le nœud qui correspond au deuxième saut (`2eme_saut`) dans le chemin. Ceci facilite la conservation d'une trace non seulement du premier saut (`1er_saut`), mais également d'une étape subséquente, ce qui facilite le routage sur différents chemins. Quand il est nécessaire d'envoyer des paquets, le nœud source a la possibilité de sélectionner entre plusieurs chemins, en utilisant les informations stockées dans le champ du deuxième saut. Cela favorise l'amélioration du routage en cas de panne du chemin principal, car il a la possibilité de basculer

rapidement vers le chemin alternatif.

La redondance des chemins offre une fiabilité accrue au protocole de routage MDSRV, ce qui permet de passer rapidement à un chemin alternatif en cas de défaillance d'un chemin principal, ce qui réduit les pertes de paquets et renforce la résilience du réseau. Il a également pour effet d'optimiser l'utilisation de la bande passante en répartissant le trafic sur différents chemins, ce qui peut également réduire la congestion du réseau. Néanmoins, MDSRV présente des désavantages, tels qu'une surcharge de messages de routage, car le maintien de plusieurs chemins pour chaque destination demande davantage de mises à jour et de communications entre les nœuds. Cela entraînera une augmentation de la latence. En outre, la gestion des tables de routage devient de plus en plus complexe, car chaque nœud doit gérer des informations supplémentaires pour différents chemins, ce qui peut entraîner une consommation de mémoire accrue et des exigences de calcul plus élevées.

2.4 Classification des contraintes liées au routage dans les réseaux MANETs

Un réseau MANET est un ensemble de nœuds mobiles qui possèdent des capacités restreintes telles que l'énergie, l'espace mémoire, etc. La recherche dans le domaine de routage dans les réseaux MANETs représente un véritable défi pour garantir une transmission fiable et assurer la durée de vie du réseau. La plupart des protocoles de routage suggérés optent pour des chemins qui réduisent le nombre de sauts (Hop Count), car c'est la mesure la plus fréquemment utilisée dans les réseaux filaires. Ainsi, les réseaux MANETs sont confrontés à un environnement plus complexe où d'autres éléments tels que les interférences. Le choix de « sauts » n'est pas toujours le meilleur, car les chemins découverts peuvent être constitués de nœuds à faible énergie qui, en cas leurs défaillance, provoquent des interruptions de communication et des partitionnement du réseau dont certaines zones peuvent devenir isolées. Différentes contraintes ont été suggérées pour les réseaux MANETs afin de proposer des algorithmes de routage qui offrent les meilleur chemins lors de la découverte pour la transmission des données.

Nous détaillerons dans cette section trois contraintes de routage importantes (objectifs et approche de calcul) dans le choix et l'amélioration des chemins dans les réseaux MANETs. La première contrainte est l'énergie ; puisque les nœuds participant dans le réseau disposent de batteries limitées qui s'épuisent rapidement par les mouvements, les opérations de calcul ainsi que l'échange des messages, la gestion efficace de l'énergie dans tels réseaux permet l'amélioration de la durée de vie de ces réseaux en diminuant la consommation d'énergie. La deuxième contrainte est la stabilité ; la mobilité des nœuds dans les réseaux MANETs entraîne régulièrement des changements dans leur topologie en raison de la création de nouvelles liaisons et de la défaillance de certaines liaisons. Les conséquences d'une défaillance de liaison dans un chemin valide affectent les performances du réseau. D'une part, cela provoque une augmentation du taux de perte des paquets de données et des paquets de contrôles pour trouver un chemin alternatif, ce qui augmentera d'autre part la surconsommation d'énergie. La troisième contrainte est celle de la qualité ; plusieurs éléments influent sur la qualité des liaisons radio, conduisant à une détérioration du signal : le bruit (provenant de l'environnement), les interférences, etc. Le domaine de recherche sur la qualité du signal reste actif, car l'estimateur de qualité de lien (LQE) actuel ne garantit pas une précision adéquate. Par la suite, nous abordons certains protocoles de routage qui reposent sur la contrainte d'énergie, de stabilité, de qualité, et d'autres qui combinent ces contraintes.

2.4.1 Méthodes d'obtention des informations liées au calcul des contraintes de routage

Différentes méthodes sont disponibles pour fournir aux nœuds les informations requises pour calculer les contraintes de routage, chacune adaptée au type de la contrainte utilisée (énergie, stabilité de lien, qualité de lien, latence, etc.). Ces informations collectées sont acquises à partir des mesures passives ou actives. Elles nécessitent généralement un traitement avant d'être utilisées pour construire une contrainte efficace. Les principales techniques utilisées par les nœuds pour obtenir ces informations sont les suivantes :

1. **Réutilisation des informations locales** Cette technique utilise les informations déjà disponibles au nœud sans avoir besoin d'envoyer des messages de contrôle, par exemple : l'énergie résiduelle, les coordonnées, le nombre d'interfaces. Cela permet de diminuer la surcharge réseau, d'optimiser les ressources limitées (telles que la bande passante, l'énergie) ainsi que l'accélération du processus de décision pour le routage.
2. **Écoute passive (passive monitoring)** En écoutant passivement le trafic réseau environnant, les nœuds peuvent obtenir des informations sur une contrainte bien précise, sans envoyer de messages supplémentaires. Cette technique réduit le nombre de messages de contrôle et diminue la surcharge réseau.
3. **Sondage actif (probing)** Les nœuds échangent des paquets de sondes pour évaluer des mesures spécifiques. Par exemple, cette technique permet d'effectuer des mesures actives sur la qualité des liens. Cependant, la taille des paquets de sonde a suscité de nombreux débats [55]. D'un côté, la taille du paquet de sondage doit être équivalente à celle des paquets de données afin de fournir des mesures pertinentes. De l'autre, les paquets de sondes ont un impact sur la qualité du trafic lorsqu'ils sont associés au trafic régulier du réseau. Cette technique conduit néanmoins à une surcharge du réseau.
4. **Sondage par intégration (piggyback)** Il s'agit d'une technique employée afin d'obtenir des données de routage tout en réduisant au minimum la surcharge du réseau. Elle repose sur l'intégration d'informations supplémentaires (par exemple : qualité du signal, nombre de retransmissions, énergie de transmission consommée, etc.) dans une en-tête spécifique des paquets réguliers, plutôt que sur l'échange des paquets spécifiques destinés exclusivement à la collecte d'informations (comme dans le cas des sondages actifs). Cette technique réduit la consommation d'énergie des nœuds et la quantité de trafic dans les réseaux.

2.4.2 Approches basées sur la mesure d'énergie

Dans les réseaux MANETs, la contrainte énergétique est perçue comme un élément essentiel. Les nœuds sans fil sont des dispositifs mobiles alimentés par des batteries, ce qui rend la gestion de l'énergie critique pour la longévité du réseau. Lors de la maintenance, la rechargement ou le remplacement de l'alimentation d'un nœud sont difficiles.

Composants consommateurs d'énergie dans un nœud sans fil

Un nœud sans fil est constitué de divers composants qui consomment l'énergie différemment, parmi lesquels on cite :

- **Module de transmission/réception radio** : c'est le composant le plus gourmand en énergie.
- **Processeur** : ce composant est utilisé pour traiter les données, gérer les paquets de contrôles et mettre en place des protocoles de communication. Sa consommation n'est pas trop coûteuse en termes d'énergie, mais elle demeure importante lors des opérations complexes de routage ou celles de cryptographie.

- **Mémoire de stockage** : le stockage et la gestion des données nécessitent également de l'énergie, mais cela représente une proportion inférieure par rapport à la transmission/réception et au traitement des données.

Dans un réseau MANET, un nœud est en état défaillant lorsque son énergie résiduelle est totalement épuisée. Ce dysfonctionnement affecte non seulement le nœud lui-même, mais aussi la transmission des données dans le réseau, puisque ce type de réseau est multi-sauts dont le transfert des paquets de données est assuré par l'ensemble des nœuds participant au chemin sélectionné.

États de consommation d'énergie d'un nœud sans fil

Dans un réseau MANET, chaque nœud peut passer par différents états de consommation d'énergie, chacun ayant sa propre consommation d'énergie. La classification ci-dessous (voir Figure 2.8) reste évolutive suite à l'apparition de nouvelles technologies éco-énergétiques dans les réseaux sans fil (comme l'IoT) [56] [57] :

- **État actif (transmission/réception)** : représente l'état de transmission ou de réception d'un paquet. Il s'agit de l'état le plus énergivore, surtout lorsque le module radio est en marche.
- **État d'écoute active** : dans cette situation, l'écoute du canal de communication permet au nœud de repérer d'éventuels paquets entrants. Même en l'absence de transmission active, l'écoute nécessite de l'énergie, en particulier si la période de veille n'est pas bien gérée.
- **État d'inactivité/veille** : les composants radio et processeurs du nœud sont en attente, en consommant moins d'énergie. Cela permet de prolonger la durée de vie de la batterie.
- **État hibernation** : il arrive que certains nœuds se mettent en mode inactif (idle), ce qui signifie que la plupart des fonctions sont désactivées. Ceci favorise des économies d'énergie optimales, mais entraîne une diminution de la réactivité du nœud, c'est-à-dire : le nœud ne peut pas recevoir ni détecter un paquet.

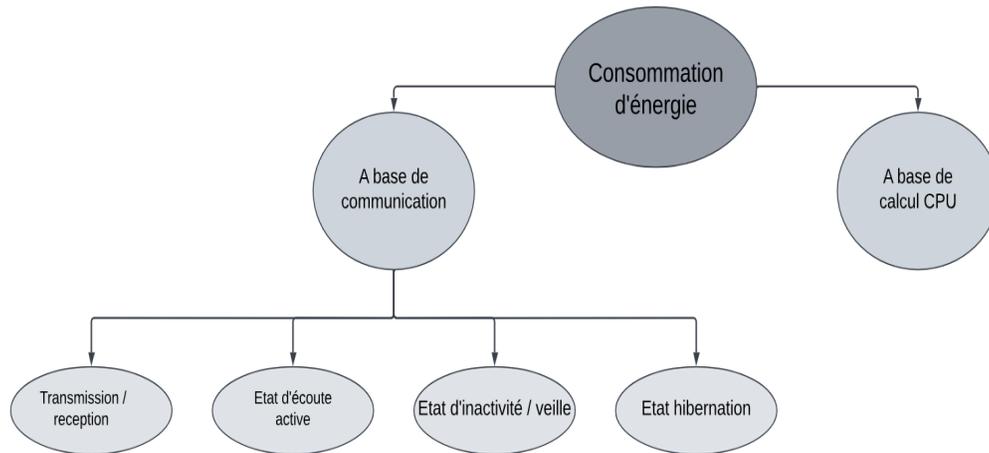


FIG. 2.8 – Mode de consommation d'énergie d'un nœud sans fil.

Causes de perte d'énergie d'un nœud sans fil

Dans les réseaux MANETs, il est possible que les nœuds sans fil subissent des pertes d'énergie provenant de différentes sources. Il est crucial de prendre en compte ces pertes d'énergie, car la

majorité des nœuds sont alimentés par des batteries à capacité limitée. Les principales sources de perte d'énergie sont les suivantes [58] [59] :

- **Communication sans fil** : la principale source de perte d'énergie dans un nœud sans fil est généralement les communications sans fil (émission et réception des paquets).
- **Le mode d'écoute actif ou veille inutile (idle listening)** : Ces deux états des nœuds sans fil participent à la consommation inutile d'énergie. Par exemple, un nœud dans un état d'écoute actif consomme de l'énergie même lorsqu'il n'y a pas de transmission de données. Aussi, en attendant ou en surveillant un canal sans recevoir de données, un nœud sans fil perd de l'énergie.
- **Mauvaise gestion du réseau** : premièrement, un protocole de routage mal conçu peut entraîner des transmissions inutiles (un flux très élevé des paquets de contrôle) ou des chemins plus longs, augmentant ainsi la consommation énergétique. Deuxièmement, si les nœuds sans fil ne sont pas synchronisés, cela peut entraîner des conflits ou des chevauchements de transmissions, ce qui demande davantage d'énergie pour les gérer.
- **Environnement et interférences** : dans un environnement sans fil, différents éléments environnementaux et interférences peuvent causer une augmentation de la perte d'énergie d'un nœud, parmi lesquels on a : les interférences radio, les conditions atmosphériques, source de bruit électromagnétique, etc.

Concept de durée de vie d'un réseau MANET

Un réseau MANET n'est capable d'atteindre son but que tant qu'il est en marche, mais pas au-delà. Il est essentiel d'avoir une durée de vie prévue lors de tout déploiement d'un réseau MANET ; c'est le temps nécessaire pour que le réseau puisse, en fonction des circonstances, maintenir une connectivité suffisante, couvrir l'ensemble du domaine ou maintenir un taux de perte d'information inférieur à un certain niveau. La vie d'un réseau est donc étroitement liée à la vie des nœuds. Elle repose principalement sur deux facteurs : la quantité d'énergie consommée et la quantité d'énergie disponible. Cette quantité d'énergie limitée est utilisée pendant la détection, la communication et la transmission de données. Il existe diverses définitions de la durée de vie d'un réseau MANET (basées sur la fonctionnalité souhaitée) :

- Il s'agit de la durée pendant laquelle le premier nœud épuise toute son énergie [60] [61].
- Il s'agit de la durée pendant laquelle une fraction β de nœuds survivants reste au plus dans le réseau [62] [63].
- Demi-vie du réseau : il s'agit de la durée pendant laquelle l'énergie de 50% des nœuds s'épuisent puis s'arrêtent de fonctionner [64].
- Il s'agit de la durée pendant laquelle tous les nœuds sont épuisés en énergie [65].
- Il s'agit de la durée pendant laquelle apparaît la première répartition du réseau en deux ou plus. Cela peut également être lié à la disparition du premier nœud (s'il occupe une position centrale) ou plus tard si la structure du réseau est robuste [64].
- Il s'agit de la durée pendant laquelle le réseau répond en permanence aux besoins de l'application désirée [66].

Enfin, il est évident que plusieurs définitions convergent, car certaines d'entre elles ne sont que des améliorations des autres, et la plupart suggèrent que la durée de vie du réseau est influencée par la consommation d'énergie de ses nœuds. Cependant, il peut être pertinent d'inclure une mesure afin d'affiner ou de sélectionner l'une de ces définitions, comme la couverture, la fiabilité, etc. Nous constatons que la définition de la durée de vie dépend aussi de l'application dévolue au réseau MANET.

Il est également crucial d'établir l'emplacement des nœuds défaillants. La présence d'une proportion de nœuds manquant d'énergie dans une partie critique du réseau, comme la connexion entre un nœud central et le reste du réseau, peut entraîner un dysfonctionnement précoce du réseau

entier. Il est important de souligner que la simulation de la durée de vie d'un réseau peut poser des difficultés statistiques. Évidemment, plus ces durées sont longues, plus le réseau fonctionne de manière optimale.

Les différents types d'approches basées sur l'énergie dans les réseaux MANETs

Les réseaux MANETs sont caractérisés par des appareils communicant directement entre eux sans infrastructure centralisée. La capacité énergétique restreinte de ces appareils a un impact sur la durabilité du réseau, car le nombre d'appareils sera réduit en raison de l'épuisement d'énergie de certains nœuds. Le dysfonctionnement d'un ou plusieurs appareils entraîne des interruptions de plusieurs liens qui peuvent être des parties des chemins de communications valides. Ceci accroît la probabilité de perte des paquets de données. Après avoir détecté une coupure de liaison, les protocoles de routage tentent de maintenir les chemins en créant un flux de contrôle considérable. Il arrive parfois que la panne d'un nœud soit critique et provoque une répartition du réseau, ce qui a un impact considérable sur les performances du réseau.

Pour cela, les méthodes de routage doivent réduire la consommation d'énergie pour optimiser la durée de vie du réseau. Différentes approches ont été suggérées pour maintenir l'énergie des nœuds. Les principaux aspects de la conservation d'énergie comprennent : la puissance de transmission, l'énergie résiduelle, la durée de vie du réseau et la gestion du mode inactif.

1. Approches basées sur la conservation d'énergie

L'approche du routage avec conservation d'énergie a pour objectif d'améliorer la consommation d'énergie dans les réseaux de communication tels que les réseaux MANETs, tout en assurant une transmission des données efficace. Son fondement repose sur la couche réseau dont la solution de routage choisit le meilleur chemin entre une source et une destination selon la contrainte d'énergie. Dans cette approche, les protocoles de routage utilisent trois catégories de mesures d'énergie [67]. La première est la puissance de transmission ; elle joue un rôle crucial dans les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc qui visent à préserver l'énergie. C'est l'énergie requise pour transférer un paquet de donnée d'un nœud vers un autre, en prenant en compte la distance, les interférences et les obstacles potentiels. Le but est de trouver le meilleur chemin pour lequel l'énergie totale consommée pour transmettre un paquet sera réduite. La deuxième est la durée de vie ; elle fait référence à la durée pendant laquelle un nœud du réseau fonctionne efficacement avant que sa source d'énergie soit épuisée. Les protocoles de routage qui utilisent cette métrique garantissent que le réseau peut rester fonctionnel aussi longtemps que possible en réduisant la consommation d'énergie. La dernière est celle de l'énergie restante ; elle est évaluée en se basant sur le premier nœud du réseau qui présente une défaillance d'énergie (épuisement total de la batterie). Il est possible d'utiliser une métrique ou de combiner plusieurs métriques lors de l'implémentation des protocoles de routage à base de conservation d'énergie. Parmi les protocoles de routage qui font appel aux métriques de conservation d'énergie nous citons : le protocole MER (Minimum Energy Routing) [68], le protocole AOMR-LM (Ad hoc On-demand Multipath Routing with Lifetime maximization) [14] et le protocole OPAOMDV-EE (Optimized Priority-based Ad Hoc on Demand Multipath Distance Vector Energy Efficient Routing Protocol) [69].

2. Approches basées sur le contrôle de la puissance de transmission

Les protocoles de routage à base de cette approche axés sur la conservation d'énergie jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de l'utilisation des ressources énergétiques des réseaux MANETs. Il s'agit d'adapter la puissance des signaux émis par chaque nœud en fonction des exigences de communication et des conditions du réseau. Lorsque cela est envisageable, en réduisant la puissance de transmission, on diminue non seulement la consommation d'énergie, mais aussi les interférences entre les nœuds adjacents. Cela permet d'améliorer la qualité des communications.

Souvent, les protocoles de routage utilisent des stratégies qui tiennent compte de la distance entre les nœuds et de l'énergie résiduelle disponible, ce qui permet de sélectionner des chemins qui équilibrent la consommation d'énergie et réduisent les pertes au minimum. Les chercheurs se focalisent de plus en plus sur l'adaptation de la puissance de transmission d'un nœud de manière à ce que le paquet atteigne sa destination avec une puissance de transmission minimale afin de préserver l'énergie des nœuds. Parmi les protocoles de routage qui font partie de cette famille nous avons : le protocole LOA-AODV (Lion Optimization Algorithm Ad-hoc On-demand Distance Vector) [70] et le protocole Le protocole EAR (Energy Aware Routing) [71].

3. **Approches basées sur le contrôle de l'état de consommation d'énergie (inactif/veille)**

Dans les réseaux MANETs, les protocoles de routage avec conservation d'énergie adoptent une approche qui repose sur le contrôle de l'état de consommation d'énergie afin de maximiser la durée de vie des nœuds en basculant selon les besoins du réseau entre les états de veille et d'inactivité. En état inactif, un nœud réduit sa consommation en désactivant certaines fonctionnalités, telles que les modules d'émission et de réception, ce qui permet d'économiser son énergie tout en préservant sa capacité à communiquer sans perte totale. De son côté, l'état de veille signifie qu'un nœud consomme encore moins d'énergie en désactivant la plupart des modules, à l'exception de ceux requis pour détecter des signaux de réveil. Dans cette situation, le nœud ne communique ni ne reçoit de données, mais peut être réactivé aisément. On gère la transition entre les états d'inactivité et de veille en utilisant des méthodes qui établissent des périodes de réveil synchronisées, telles que le wake-up scheduling, ou en implémentant des protocoles d'organisation en cluster qui incluent des algorithmes d'auto-organisation, permettant à certains nœuds du réseau (généralement les chefs de cluster) de rester en état actif pour garantir la connectivité, tandis que d'autres passent en état de veille. GAF (geographic adaptive fidelity) [72] est un protocole de routage conçu pour les réseaux sans fil qui se base sur cette approche.

4. **Approches basées sur l'équilibrage de la charge**

L'objectif de l'équilibrage de la charge dans les protocoles avec conservation d'énergie implémentés pour les réseaux MANETs est d'améliorer la durée de vie d'un réseau en répartissant de manière équilibrée le trafic entre les nœuds. Contrairement aux approches mentionnées précédemment qui reposent sur la puissance de transmission ou l'énergie restante, les protocoles de cette catégorie se focalisent sur l'équilibrage de charge sur les chemins découverts. Ils transmettent les données selon les chemins disponibles pour garantir une consommation d'énergie équilibrée des nœuds du réseau. Voici quelques protocoles de routage multi-chemins qui utilisent cette approche : Le protocole LB-AOMDV (Load Balancing AOMDV) [73] et le protocole EE-LB-AOMDV (Efficient Energy Load Balancing AOMDV) [74].

Les chercheurs ont fourni des solutions de routage pour diminuer la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie des réseaux MANETs. La contrainte d'énergie demeure un défi majeur pour ce type de réseaux. Une option captivante consiste à utiliser une combinaison de divers facteurs d'énergie pour optimiser les performances. Dans la partie suivante, nous aborderons une autre contrainte cruciale, à savoir la stabilité.

2.4.3 **Approches basées sur la mesure de la stabilité des liens**

La mobilité des nœuds est une principale caractéristique des réseaux MANETs, ce qui constitue un avantage majeur où les nœuds du réseau peuvent se déplacer librement. Il est important que chaque nœud reste dans une zone de couverture afin de maintenir une connexion avec ces voisins. Toutefois, compte tenu de la portée limitée de la transmission des nœuds, le déplacement d'un nœud en dehors de la zone de couverture entraîne une rupture de la liaison avec le nœud voisin et la transmission n'est plus possible entre ces deux nœuds. La modification fréquente de cette topologie en raison de ces interruptions a un effet sur les performances du réseau, la fiabilité de transmission,

ainsi que sur d'autres critères de qualité de service tels que le taux de perte, le délai de bout en bout, etc.

En raison de l'influence de la mobilité des nœuds sur les performances des réseaux, plusieurs études ont été menées au cours des dix dernières années sur la stabilité des liens, principalement influencée par la mobilité des nœuds. Le but est de choisir le chemin la plus stable pour minimiser le nombre d'interruptions et garantir une fiabilité accrue. Différentes méthodes ont été employées dans la littérature : technique de prédiction ([75] [76]), technique de probabilité [77], estimation de durée de vie [78].

Concept de stabilité dans les réseaux MANETs

La notion de stabilité est un concept essentiel qui est présent dans divers domaines tels que l'informatique, l'ingénierie, la physique, la biologie, l'économie et même la psychologie. Elle fait généralement référence à la capacité d'un système ou d'un objet à conserver son état ou son équilibre en dépit de perturbations ou de forces supérieures. Dans les réseaux ad hoc, la notion de stabilité est évaluée en se basant sur la mobilité des nœuds. On définit la stabilité d'un lien comme la durée de vie restante d'un lien. Elle peut être une valeur de distance, une valeur de probabilité ou autres valeurs associées [79].

Classification des stabilités des liens

La stabilité est classée en fonction du facteur employé pour son évaluation en deux catégories : basée sur la distance et basée sur la mobilité [79].

- **Stabilité d'un lien basée sur la distance**

Dans les réseaux MANETs, la stabilité des liens basée sur la distance désigne la robustesse et la longévité des liaisons entre les nœuds selon leur distance physique. Au sein de ces réseaux, les nœuds interagissent entre eux sans infrastructure fixe, ce qui rend les connexions sensibles aux mouvements des nœuds et aux changements de distance. La stabilité des liens repose donc sur la proximité des nœuds : plus deux nœuds sont proches, plus leur liaison a de chances de rester stable. La probabilité de déconnexion augmente avec la distance entre deux nœuds, à cause de la baisse de la force du signal et de l'accroissement des interférences. En fonction de paramètres tels que la distance entre les nœuds, la puissance du signal et la durée de la connexion, les protocoles de routage évaluent la stabilité des liens entre les nœuds, ce qui favorise les liens les plus stables pour établir un chemin. De manière concrète, cela nécessite l'emploi des méthodes (algorithmes) de calcul de stabilité qui prennent en considération la distance entre les nœuds afin de déterminer si une connexion est susceptible de résister. En prenant en compte ces données, le protocole met l'accent sur les chemins proposant les liaisons les plus stables, ce qui diminue les risques de rupture et de recalcul des chemins, et donc améliore la qualité de service dans les réseaux MANETs souvent dynamiques. Le protocole RSQR (Route Stability based QoS Routing) [80] est un protocole de routage QoS conçu pour les réseaux MANET basé sur la stabilité des liens.

- **Stabilité d'un lien basée sur la mobilité**

Les protocoles de routage de cette classe implémentés dans les réseaux MANETs sont conçus dans le but d'améliorer la performance et la fiabilité des transmissions dans des environnements où les nœuds sont très interactifs. Ils tiennent compte de la durabilité des liaisons et de la fréquence de leur rupture entre les nœuds inclus dans les chemins découverts afin de choisir des chemins de communication plus stables. L'évaluation de la stabilité des liens à base de la mobilité peut être effectuée en utilisant des paramètres tels que la durée de vie estimée des liens, la vitesse relative

des nœuds ou leur direction du mouvement. Le protocole ST_OLSR (Link Stability OLSR) [81] est un protocole de routage QoS basé sur la stabilité des liens conçu pour les réseaux MANETs. L'utilisation de la stabilité basée uniquement sur la distance peut entraîner une surestimation de la valeur de stabilité, car la distance elle-même ne reflète pas le comportement mobile. La variation de la distance entre les nœuds est une méthode plus précise pour évaluer la stabilité des liens dans les réseaux MANETs. Cette méthode estime comment cette distance évolue dans le temps. Une liaison est considérée comme étant potentiellement stable si la variation de distance est faible, c'est-à-dire qu'un nœud se déplace de manière cohérente par rapport à l'autre, soit dans la même direction et à une vitesse équivalente, soit en restant relativement statiques. Pour la deuxième classe qui se base sur la mobilité des nœuds pour estimer la valeur de la stabilité des liens, mais cette approche peut mener à des prévisions de mobilité qui ne sont pas toujours précises dans des environnements très dynamiques ou lorsque le comportement de mobilité des nœuds change suivant le modèle de mobilité.

Les différents modèles de mobilité

L'importance des modèles de mobilité dans le fonctionnement des réseaux MANETs est primordiale. Les simulations et les prédictions des déplacements des nœuds permettent d'évaluer les performances du réseau en ce qui concerne la connectivité, la latence, la consommation d'énergie et la capacité de transfert des données. La topologie du réseau est directement influencée par le déplacement et l'interaction des nœuds, ce qui peut présenter une instabilité et une dynamique dues aux déplacements constants. La littérature a présenté différents modèles de mobilité, qui peuvent être divisés en deux catégories : aléatoire et non aléatoire. Les modèles non aléatoires sont répartis en trois catégories (voir Figure 2.9) [82].

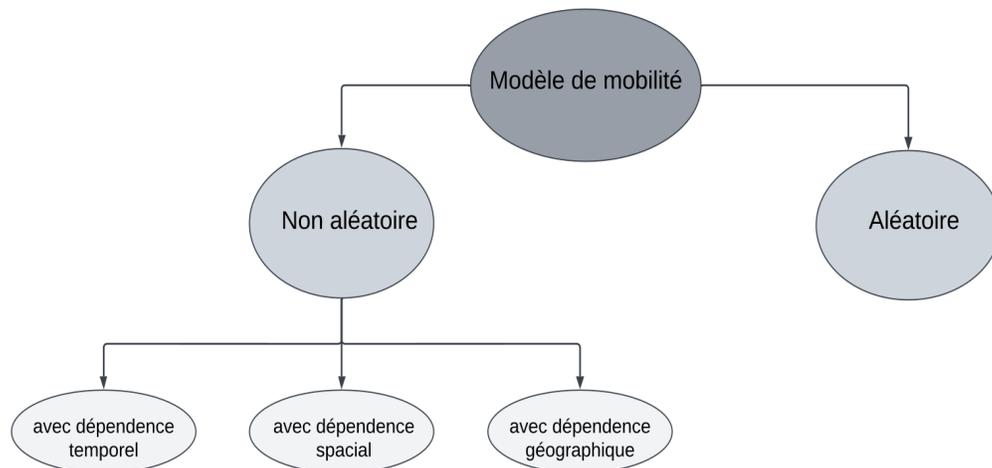


FIG. 2.9 – Modèles de mobilité.

1. **Mobilité aléatoire** Dans ce modèle, les nœuds se déplacent de façon aléatoire. En particulier, la localisation de destination, la vitesse et la direction sont toutes sélectionnées au hasard et sans tenir compte des autres nœuds. Ce genre de modèle a fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine des simulateurs. On peut citer parmi les différents modèles de mobilité [83]
 - **Random Waypoint (RWP)** Le fonctionnement du modèle Random Waypoint repose sur la simulation d'un déplacement aléatoire pour chaque nœud dans une zone spécifique. Au cours de chaque cycle, un nœud sélectionne une destination aléatoire dans l'espace de simulation, puis sélectionne une vitesse aléatoire comprise entre la valeur minimale V_{min} et la valeur

maximale V_{max} prédéfinie, puis se déplace en ligne droite vers elle. Une fois arrivé, le nœud a la possibilité de faire une pause pour une période T_{pause} aléatoire ou fixe, ce qui a un impact sur la stabilité de la topologie du réseau ; les pauses périodes les plus longues ont tendance à stabiliser temporairement le réseau, tandis que les pauses périodes courtes augmentent la fréquence des modifications de liaisons. Ce processus se reproduit jusqu'à la fin de la simulation.

- **Random Walk (RW)** Le modèle de mobilité Random Walk est employé afin de simuler les déplacements aléatoires des nœuds dans les réseaux MANETs, en imitant les mouvements imprévisibles observés lors des processus de diffusion de particules ou de marche au hasard. Ce modèle implique que chaque nœud sélectionne aléatoirement à chaque intervalle de temps une direction et une vitesse, ce qui crée une trajectoire erratique sans destination fixe. Lorsque le nœud atteint les limites de la zone de simulation, il rebondit en prenant une nouvelle direction vers l'intérieur de la zone, sans dépasser les bords. On répète ce processus à chaque fois, ce qui génère un mouvement constant et irrégulier. Le modèle Random Walk, à la différence du modèle Random Waypoint, ne présente pas de pause ; le nœud se déplace de manière continue, ce qui en fait un modèle intéressant pour simuler des déplacements incessants. Cependant, il peut entraîner une faible couverture de l'espace, car les nœuds ont tendance à rester confinés près de leurs positions initiales.
- **Random Direction (RD)** Le modèle Random Direction est un modèle de mobilité employé dans les réseaux MANETs afin de simuler un déplacement aléatoire des nœuds tout en évitant les problèmes de densité centrale, fréquemment rencontrés avec d'autres modèles tels que le Random Waypoint.

Dans ce modèle de mobilité, chaque nœud sélectionne d'abord aléatoirement une direction et se déplace en ligne droite à une vitesse constante (sélectionnée aléatoirement dans une plage préétablie) jusqu'à atteindre la limite de la zone de simulation. Après avoir atteint la limite, le nœud s'arrête pendant une période déterminée ou aléatoire, puis sélectionne une nouvelle direction aléatoire, généralement éloignée du bord, et reprend son mouvement. Les nœuds peuvent être répartis de manière plus homogène dans la zone de simulation grâce à cette mécanique, ce qui permet de réduire le phénomène de regroupement central observé dans d'autres modèles. Ce modèle s'avère très pratique pour simuler des situations où les nœuds se déplacent de manière étendue dans un environnement, car il garantit une couverture plus homogène de l'espace.

2. Mobilité non aléatoire

Le modèle de mobilité non aléatoire consiste à expliquer et anticiper les mouvements des individus ou des groupes dans un espace donné, en tenant compte de l'idée que les comportements de mobilité sont guidés par des motifs et des régularités plutôt que par des mouvements aléatoires. À la différence des modèles aléatoires, où les déplacements sont incertains, ce modèle s'appuie sur des schémas de mobilité déterminés par des habitudes, des préférences et des besoins sociaux, économiques ou environnementaux. En général, il existe trois catégories de mobilité non aléatoire :

- **Mobilité avec dépendance temporelle** Le mouvement dans la réalité ne s'exprime pas dans le modèle aléatoire. Certaines contraintes physiques peuvent entraver la mobilité des nœuds. Dans ce modèle, le mouvement d'un nœud est influencé par le mouvement précédent. Gauss-Markov est le modèle le plus célèbre de dépendance temporelle connu. C'est un modèle stochastique couramment utilisé pour représenter les trajectoires de mobilité, en particulier dans le domaine des réseaux de télécommunications et de la robotique. Il a été développé dans le but de diminuer l'impact de la sélection aléatoire des paramètres de mobilité en introduisant une dépendance temporelle où la mobilité actuelle d'un nœud est implicitement liée à son mouvement précédent. Le modèle Gauss-Markov ressemble au modèle Random Walk, où le nœud sélectionne une vitesse et une direction qui seront modifiées à chaque T

intervalle de temps [83]. Dans le modèle Gauss-Markov, chaque nœud calcule sa nouvelle vitesse et sa nouvelle direction en fonction de la vitesse et de la direction précédentes en utilisant un coefficient α (qui varie entre 0 et 1), qui représente le degré de dépendance de la manière suivante :

$$\begin{cases} S_n = \alpha * S_{n-1} + (1 - \alpha) * \mu + \sqrt{1 - \alpha^2} * Sx_{n-1} \\ \theta = \alpha * \theta_{n-1} + (1 - \alpha) * \mu + \sqrt{1 - \alpha^2} * \theta x_{n-1} \end{cases}$$

- **Mobilité avec dépendance spatiale** c'est une méthode qui estime que les mouvements des individus sont fortement influencés par leur position actuelle et par la structure spatiale de leur environnement naturel. Il s'appuie sur l'idée que les trajets et les destinations ne sont pas aléatoires, mais qu'ils sont influencés par la proximité géographique, la disposition des lieux d'intérêt et des points d'interaction dans l'espace. En plus, le mouvement des nœuds dans ce modèle est de plus en plus similaire à un déplacement en groupe (les nœuds voisins). Parmi les modèles de mobilité avec dépendance spatiale, on trouve les modèles : Reference Point Group et Column Mobility [82].
- **Mobilité avec restriction géographique**
 Dans les modèles de mobilité cités ci-dessus, les nœuds se déplacent librement (n'importe où) dans la zone de simulation (espace libre). Toutefois, dans la réalité, le mouvement n'est pas entièrement libre, mais il est limité comme, le déplacement des êtres humains dans les villes ou le déplacement des véhicules dans un réseau routier. Parmi les modèles de mobilité qui ont été suggérés en prenant en considération un mouvement réel et limité :

– **Freeway**

Freeway Mobility [84] est employé afin d'imiter le comportement des nœuds mobiles d'un réseau MANET sur une autoroute. Il peut servir à échanger du trafic ou à suivre un véhicule sur une autoroute. Dans ce modèle, les auteurs font appel à des cartes. On peut générer des chemins aléatoires sur la carte, représentant un modèle d'autoroute avec un nombre d'autoroutes et chaque autoroute avec un nombre de chemins de circulation dans les deux sens. Au départ, les nœuds sont disposés de manière aléatoire sur les bords. Chaque nœud se rend à une destination (sélectionnée au hasard) en suivant le chemin le plus court, en utilisant uniquement les chemins disponibles (avec un déplacement limité sur les chemins disponibles). Le nœud s'arrête à l'arrivée pendant un intervalle T et sélectionne une nouvelle destination pour le mouvement suivant.

– **Manhattan**

Il s'agit d'un modèle semblable au Freeway. Manhattan Mobility [84] est utilisé pour émuler le modèle de circulation des appareils mobiles dans des rues établies à l'aide des cartes. La Figure 2.10 illustre un exemple de la carte de Manhattan utilisée. La carte est constituée d'un nombre de chemins verticales et horizontales. Chaque nœud se déplace sur le chemin, et à chaque croisement, avec une valeur de probabilité égale à 0.25, il peut tourner soit à gauche, soit à droite. Ce modèle peut s'avérer bénéfique pour représenter la circulation dans une zone urbaine où un service d'échange informatique entre appareils portables est envisagé.

2.4.4 Approches basées sur la mesure de la qualité des liens

À l'instar de n'importe quel type de réseau sans fil, les réseaux MANETs sont particulièrement vulnérables à des problèmes de signal pouvant être influencés directement par des événements internes (comme les interférences) ou externes (tels que le bruit). Ainsi, les liaisons sans fil radio sont moins fiables et peuvent changer de façon imprévisible à tout instant. Par exemple, un environnement urbain peut être perçu comme bruyant, avec des niveaux de bruit plus élevés en comparaison

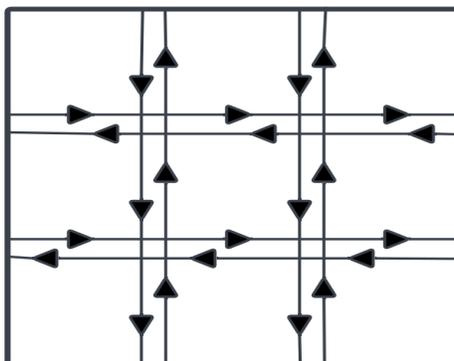


FIG. 2.10 – Carte de Manhattan.

à un espace ouvert (libre). La présence d'obstacles va accroître le taux de rupture des liens entre les nœuds. Cela détériorera l'efficacité du protocole de routage qui n'intègre pas la contrainte de la qualité du signal dans le choix du meilleur chemin optimal. Effectivement, pour garantir une meilleure performance d'un protocole de routage en environnement réel, il est essentiel de considérer la contrainte de qualité du signal lors de l'évaluation et du choix des chemins. Dans ce cadre, les chercheurs du domaine ont suggéré des estimateurs de qualité (LQE : link quality estimator) pour estimer la qualité du signal. On distingue deux catégories d'estimateurs : ceux basés sur le physique (hardware-based) et ceux basés sur le logiciel (software-based) [85].

2.4.4.1 Concept de transmission radio

Dans un réseau sans fil, la portée de transmission est restreinte. Une zone de diffusion est répartie en trois régions :

- **Région connectée** : désigne la zone où la liaison est de bonne qualité, stable et avec un taux élevé de livraison.
- **Région déconnectée** : désigne la zone présentant une mauvaise qualité de liaison, instable avec un taux de livraison très bas. Il faut éviter les liaisons de cette zone lors de la transmission des données.
- **Région de transition** : désigne la région intermédiaire ; dans cette zone, la qualité des liaisons est moyenne, instable et sensible à des variations dont la qualité peut se détériorer considérablement. C'est la zone la plus vaste.

2.4.4.2 Qualité du signal d'une liaison sans fil

Les nœuds sans fil utilisent des signaux radio pour la transmission des messages dans un réseau MANET. De nombreux phénomènes influencent considérablement la puissance et la qualité du signal lors de la transmission, tels que la transmission, la diffraction, la diffusion et la réflexion. D'autres facteurs peuvent aussi affecter le signal, notamment la présence de bruits (noise) produits par des éléments externes du réseau, ainsi que les interférences.

Pour minimiser les impacts des changements des liaisons sur le fonctionnement des protocoles de routage, il est primordial d'intégrer la qualité du signal lors de l'élaboration d'un protocole de routage et de l'incorporer dans le processus d'évaluation ou de sélection des chemins. Nous avons déjà évoqué les facteurs principaux de la perte des connexions, à savoir la mobilité et l'énergie. Toutefois, dans un contexte similaire, même avec des nœuds stables (sans déplacement) ayant une longévité supérieure, l'effet des phénomènes de diffusion du signal peut engendrer une instabilité

des liaisons, entraînant des interruptions et des coupures de transmission. Ces impacts diminuent la fiabilité du protocole de routage tout en dégradant la performance du réseau.

Dans ce cadre, des auteurs ont mis en place des estimateurs de qualité LQE (Link Quality Estimator) afin d'évaluer en permanence la qualité en fonction de diverses caractéristiques. Cette estimation n'a pas de définition universelle, ni d'unité de mesure standardisée ; elle peut être une valeur quantitative, une probabilité, etc.

L'évaluation de la qualité d'une liaison implique l'analyse d'une métrique dans une fenêtre bien déterminée, que ce soit en termes de temps (en secondes) ou du nombre de paquets (reçus / envoyés), afin de mesurer la performance d'une liaison.

L'estimateur LQE peut être effectué en se basant sur plusieurs paramètres : la stabilité, le taux de livraison, la puissance de signal, l'asymétrie, etc. [86]. On peut envisager la qualité d'une liaison comme une caractérisation qualitative ou quantitative de celle-ci qui reflète sa fiabilité [87]. Pour estimer la qualité d'une liaison, nous devons suivre trois étapes : la surveillance de la liaison (peut être active, passive ou hybride), le calcul de la liaison et l'évaluation de la métrique.

2.4.4.3 Classification des estimateurs de la qualité des liens

Les métriques LQE décrites dans la littérature peuvent être classées en tant que logiques ou physiques, également connues sous les termes de software ou hardware respectivement. Les métriques logiques sont dérivées des couches supérieures. Elles peuvent être classées en trois (03) catégories : métrique basée sur PRR (Packet Reception Ratio), métrique basée sur RNP (Required Number of Packet Retransmissions) ou métrique basée sur un score. Les métriques physiques sont fournies directement par le matériel radio. Les plus courantes de cette catégorie sont : SNR (Signal-to-Noise Ratio), LQI (Link Quality Indicator) et RSSI (Received Signal Strength Indicator). La Figure 2.11 illustre la classification des métriques d'estimations de la qualité du lien [86].

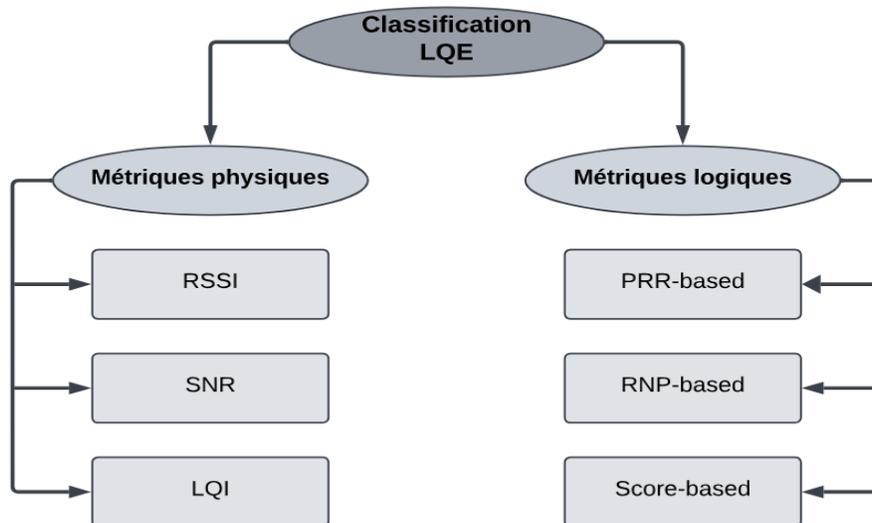


FIG. 2.11 – Classification de l'estimateur LQE.

2.4.4.4 Protocoles de routage basés sur la métrique de qualité des liens

Plusieurs protocoles de routage implémentés dans les MANETs utilisent la contrainte de qualité de lien lors du choix du meilleur chemin optimal pour la transmission des paquets de données. Cette

contrainte peut être mesurée soit à base d'une métrique physique ou logique, sinon en combinant les deux métriques qui sont de nature hétérogène, et cela peut fournir une estimation plus globale de la qualité des liaisons. Parmi les protocoles de routage basés sur la métrique de qualité des liens nous citons : Le protocole OLSR-LQP [88] et le protocole à base de la métrique de qualité nommée ETX_ANT [89].

2.4.5 Approches basées sur la mesure de plusieurs contraintes

Dans les sections antérieures, nous avons discuté des trois contraintes : énergie, stabilité et qualité. Le recours exclusif à une seule contrainte ne garantit pas l'amélioration des performances des réseaux ad hoc. On peut affirmer que la rupture des liaisons influence grandement la performance du réseau : accroissement du taux de perte des paquets, surcharge du flux de contrôle pour assurer la communication, gaspillage d'énergie (les paquets perdus et l'excès de flux de contrôle, etc.). Ainsi, des causes fondamentales sont à l'origine de ces interruptions : défaillance d'un nœud mobile due à l'épuisement de sa batterie, mobilité lorsqu'un nœud s'éloigne de la portée de transmission d'un autre, ainsi que les effets des phénomènes de diffusion du signal.

Les chercheurs du domaine tentent de combiner ces trois contraintes pour profiter des avantages offerts par chacune, la stabilité, l'énergie et la qualité dans le but de déterminer le meilleur chemin. Cette association garantit un routage sûr qui minimise de manière efficace les interruptions des liaisons et prolonge au maximum la longévité du chemin sélectionné. Dans la littérature, on a proposé plusieurs protocoles de routage qui allient entre ces trois contraintes, à savoir l'énergie, la stabilité et la qualité ([90] [91]).

2.5 Conclusion

Grâce à l'analyse menée sur les réseaux mobiles ad hoc (MANETs), nous avons pu identifier leurs diverses caractéristiques (absence d'infrastructure, topologie dynamique, contraintes d'énergie, bande passante limitée, sécurité physique limitée, etc.). Nous avons pu constater que leur apparition a simplifié la mise en œuvre d'applications mobiles, mais a également engendré de nombreux problèmes, dont celui du routage.

Selon les études menées sur les protocoles de routage qui se basent sur le nombre de sauts, ils ne permettent pas d'améliorer les performances des réseaux ad hoc, car ils négligent les contraintes qui les caractérisent et qui impactent la transmission, comme l'énergie des nœuds, la mobilité des nœuds, la qualité du signal, etc. Nous avons examiné trois contraintes essentielles qui influencent considérablement la performance des protocoles de routage et la durée de vie des réseaux : énergie, stabilité et qualité. Chaque contrainte est présentée avec un état de l'art.

Dans les réseaux MANETs, les nœuds utilisent leurs énergies résiduelles lors de toutes opérations, en particulier lors de l'échange des données et de la contribution dans le routage. Nous avons exposé la variabilité de la consommation d'énergie en fonction du mode d'opération et abordé les diverses sources de pertes d'énergie, puis nous avons présenté une classification des méthodes de conservation d'énergie. L'utilisation de la contrainte d'énergie dans un protocole de routage vise principalement à optimiser la durée de vie des nœuds et celle du réseau, afin de garantir une gestion énergétique efficace, de réduire le nombre de nœuds qui consomment leur énergie et de réduire la consommation d'énergie.

La dynamique de la topologie du réseau causée par la mobilité des nœuds entraîne des interruptions fréquentes des liaisons. La contrainte de stabilité permet d'évaluer la durée de vie d'un lien en fonction de sa capacité à se déplacer (mobilité). La stabilité peut être classifiée en fonction de la

distance ou de la mobilité. L'incorporation de la contrainte de stabilité dans le routage nous permet d'éviter les liens qui sont très susceptibles d'être rompus en analysant la mobilité des nœuds.

Nous avons présenté les divers modèles de mobilité de la littérature. Les modèles de mobilité déterminent comment les nœuds se déplacent dans un espace. On les regroupe principalement en deux catégories : les modèles aléatoires et les modèles non aléatoires. La plupart de ces modèles ne sont pas représentatifs du mouvement réaliste. Selon des recherches, il a été démontré que le choix du modèle de mobilité a un impact sur les performances des MANETs.

L'évaluation des liaisons est indispensable pour garantir une transmission robuste et fiable, permettant aux protocoles de routage d'éviter le problème de l'insuffisance de fiabilité du signal. Donc, il est indispensable de prendre la contrainte de qualité du lien en considération dans le processus d'évaluation des protocoles de routage lors de la sélection des meilleurs chemins. Dans cette partie, nous avons présenté des concepts sur la transmission radio et nous avons illustré la classification des estimateurs LQE.

Enfin, nous avons exposé certains protocoles de routage qui ont combiné les contraintes (énergie, stabilité et qualité) pour améliorer les performances des MANETs et garantir une communication fiable. Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons aux méthodes bio-inspirées, où nous abordons leur efficacité et leur capacité à résoudre des problèmes complexes.

Chapitre 3

Méthodes bio-inspirées

Contents

3.1	Introduction	43
3.2	Diverses méthodes de résolution de problèmes	44
3.2.1	Les méthodes exactes	44
3.2.2	Les méthodes approchées	44
3.3	Les algorithmes bio-inspirés	45
3.3.1	Bio-inspiration en informatique	45
3.3.2	Pourquoi les algorithmes bio-inspirés ?	45
3.3.3	Passage d'un phénomène naturel vers un algorithme bio-inspiré	46
3.4	Taxonomie des algorithmes bio-inspirés	46
3.4.1	Algorithmes évolutionnaires classiques	46
3.4.2	Algorithmes basés sur l'intelligence distribuée	51
3.4.3	Algorithmes écologiques	65
3.4.4	Discussion	67
3.5	Conclusion	71

3.1 Introduction

Pour résoudre des problèmes de grande complexité en informatique, deux grandes catégories de méthodes sont fréquemment employées dans le domaine de la recherche opérationnelle et l'optimisation : les méthodes exactes et les méthodes approchées. Les méthodes exactes cherchent à trouver une solution optimale en examinant toutes les possibilités de manière exhaustive ou en utilisant des techniques mathématiques particulières, par exemple l'utilisation de la programmation linéaire, les algorithmes branch-and-bound ou la programmation dynamique pour assurer l'efficacité dans les réseaux ad hoc de petite ou moyenne échelle, où les calculs peuvent être réalisés sans dépasser les ressources disponibles. Néanmoins, elles ne sont pas directement applicables à la majorité des problèmes réels, car le temps d'exécution nécessaire augmente de manière exponentielle avec l'étendue des réseaux ad hoc. D'autre part, les méthodes approchées proposent une solution viable pour résoudre un problème complexe où les solutions optimales ne sont pas indispensables ou difficiles à

obtenir dans des délais légitimes. Il est possible que ces méthodes ne fournissent pas toujours une solution optimale, mais elles permettent de générer des solutions suffisamment bonnes.

Aussi, la nature joue un rôle essentiel dans la résolution de problèmes complexes en informatique, car elle présente des phénomènes très variés, robustes, dynamiques, complexes. Elle parvient toujours à trouver la meilleure solution pour résoudre un problème donné, en cela en maintenant un équilibre entre ses différentes composantes. Les algorithmes inspirés de la nature (bio-inspirés) ouvrent une nouvelle ère en utilisant des méta-heuristiques qui imitent la nature afin de résoudre les problèmes d'optimisation. Au cours des dernières décennies, de nombreuses études ont été focalisées sur ce domaine. Ce chapitre offre une perspective globale sur les algorithmes bio-inspirés, classés en fonction du domaine biologique qui les a inspirés.

3.2 Diverses méthodes de résolution de problèmes

À l'heure actuelle, les chercheurs font souvent face à des défis technologiques de plus en plus complexes, qui demandent de grandes ressources matérielles et logicielles. Il existe divers domaines où ces problèmes se posent, tels que le routage dans les réseaux sans fil, le traitement d'images, la robotique, la collecte de données, la recherche opérationnelle, etc. Il est donc essentiel de concevoir des techniques de résolution fiables, robustes, distribuées et tolérantes face aux pannes. On peut présenter ce genre de problèmes sous la forme d'un problème d'optimisation, qui est généralement simple à identifier, mais souvent complexe à résoudre. Effectivement, la majorité de ces problèmes d'optimisation sont classés dans la catégorie des problèmes NP-difficiles et n'ont donc pas encore de solution algorithmique efficace et applicable à toutes les données. Plusieurs méthodes de résolution ont été développées et qui sont réparties en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées (approximatives) [92].

3.2.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes permettent de déterminer la solution la plus optimale pour résoudre un problème d'optimisation en examinant en détail toutes les solutions envisageables. Ces méthodes présentent un inconvénient majeur, à savoir le temps de calcul requis pour trouver une solution, qui risque d'augmenter de manière exponentielle avec la complexité du problème. La programmation dynamique, l'algorithme du simplexe et l'algorithme de séparation et d'évaluation (Branch & Bound) font partie de cette famille de méthodes [92].

3.2.2 Les méthodes approchées

À la différence des méthodes exactes, les méthodes approchées sont incomplètes : elles permettent de trouver des solutions de bonne qualité (raisonnable) ; cependant, cela ne garantit en aucun cas l'efficacité optimale de celles-ci. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories [92] :

Les heuristiques

De la langue grecque, le terme heuristique est dérivé du verbe *heuriskein* qui signifie trouver. Un algorithme appelé heuristique permet de trouver une solution réalisable dans un temps polynomial en prenant en compte une fonction objectif, qui n'est pas nécessairement optimale (approchée) ou exacte pour un problème d'optimisation complexe. Ce genre de méthodes exprime une stratégie (une façon de penser) basée sur la compréhension du problème. Une heuristique concerne un problème particulier et ne peut pas être généralisée.

Les méta-heuristiques

Le terme méta-heuristique est formé de deux termes grecs : méta et heuristique. Le mot « méta » est un suffixe qui signifie « au-delà », c'est-à-dire « au-dessus ». Une méthode méta-heuristique est une méthode heuristique générique qu'il est nécessaire d'adapter à chaque problème [93]. De nombreuses définitions ont été suggérées afin d'expliquer de manière précise ce qu'est une méthode méta-heuristique. Aucune des définitions n'est universellement reconnue.

Une méta-heuristique consiste en un processus itératif qui subordonne et oriente une heuristique, en combinant de manière astucieuse plusieurs concepts afin d'explorer et d'exploiter l'ensemble de l'espace de recherche. Il est possible de les qualifier d'heuristiques modernes, de plus haut niveau, spécialement conçues pour résoudre des problèmes d'optimisation. On utilise des méthodes d'apprentissage pour structurer l'information et trouver de manière efficace des solutions optimales ou presque optimales [94].

3.3 Les algorithmes bio-inspirés

Les algorithmes bio-inspirés sont des méthodes d'optimisation stochastiques qui s'inspirent de divers phénomènes du monde naturel. Ces algorithmes tirent notamment leur inspiration des comportements sociaux des animaux et des insectes, des évolutions des espèces ou des actions intelligentes de certains organismes. Dans la nature, ces organismes et espèces parviennent toujours à trouver la stratégie appropriée pour se défendre (par exemple, le système immunitaire), s'adapter à un environnement (par exemple, l'évolution différentielle) ou trouver de la nourriture (par exemple, les fourmis et les loups gris).

3.3.1 Bio-inspiration en informatique

Les méthodes bio-inspirées sont devenues de plus en plus importantes dans le domaine de l'informatique en raison de la demande de souplesse, de solutions adaptables pour résoudre les problèmes d'ingénierie. La structure et le fonctionnement des systèmes naturels complexes sont à la base des algorithmes bio-inspirés, qui ont tendance à résoudre les problèmes de manière adaptable et distribuée [95].

3.3.2 Pourquoi les algorithmes bio-inspirés ?

Depuis des centaines de millions d'années, la nature a continué d'innover, d'inventer, de tester, de valider, d'améliorer et de diversifier les systèmes vivants, toujours en tant que source d'inspiration. Ces phénomènes extraordinaires nous offrent des solutions grâce à leurs caractéristiques comme [95] :

- L'émergence : les éléments simples qui se combinent vont réaliser des tâches remarquables.
- La facilité de la mise en œuvre.
- L'auto-organisation : consiste à structurer automatiquement le système interne sans être influencé par une source externe.
- La modularité : implique que le système est constitué d'éléments simples qui travaillent ensemble afin d'atteindre le but global. Le système est donc flexible.
- La décentralisation : assure un système robuste qui peut continuer à fonctionner en cas de dysfonctionnement d'un de ses éléments.
- La réactivité : consiste à coopérer et communiquer entre les différents éléments du système grâce à des interactions locales. Ils ont la capacité de réagir immédiatement aux modifications de l'environnement.

- L'auto-adaptation : la capacité d'un système à ajuster ses paramètres de manière à maintenir un fonctionnement satisfaisant malgré les fluctuations de son environnement.

3.3.3 Passage d'un phénomène naturel vers un algorithme bio-inspiré

En premier lieu, la nature inspire les chercheurs à élaborer une observation d'un phénomène naturel bien particulier. Tout d'abord, les développeurs élaborent et évaluent un modèle, en utilisant des simulations mathématiques qui contribuent à améliorer le modèle original. Par la suite, le modèle raffiné sera employé afin d'extraire une méta-heuristique qui peut servir de fondement à la conception d'un algorithme inspiré de la nature. Le cadre utilisé pour passer d'un phénomène naturel à un algorithme inspiré de la nature est présenté dans la Figure 3.1.

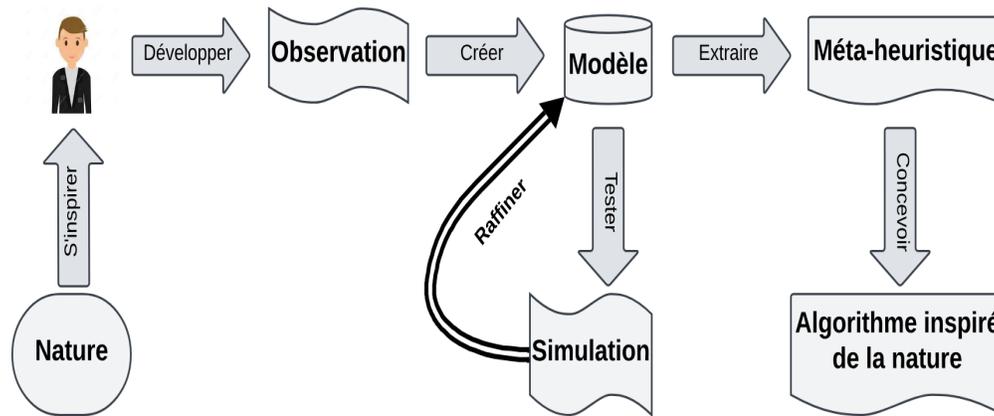


FIG. 3.1 – Passage d'un phénomène naturel à un algorithme bio-inspiré.

3.4 Taxonomie des algorithmes bio-inspirés

Une panoplie de méta-heuristiques inspirées de la nature existe dans la littérature. Ces algorithmes bio-inspirés se divisent principalement en trois catégories : les algorithmes évolutionnaires (s'inspirent de la sélection naturelle), les algorithmes basés sur les essaim (s'inspirent du comportement collectif chez les animaux) et les algorithmes inspirés de l'écologie (s'inspirent des processus naturels observés dans les écosystèmes) [96]. L'illustration 3.2 présente ces trois catégories du domaine bio-inspiré.

3.4.1 Algorithmes évolutionnaires classiques

Principe d'inspiration

Les algorithmes évolutionnaires sont perçus comme les algorithmes les plus anciens en intelligence artificielle pour résoudre les problèmes d'apprentissage automatique et ceux d'optimisation combinatoire. Les algorithmes utilisés sont basés sur la théorie de l'évolution des êtres vivants, déclarée par Charles Darwin en 1859 (sélection naturelle des espèces naturelles) [97]. Le concept fondamental de ces algorithmes repose sur l'évolution d'une population d'individus dans le temps et d'une génération à l'autre vers une population d'individus mieux adaptés à leur environnement.

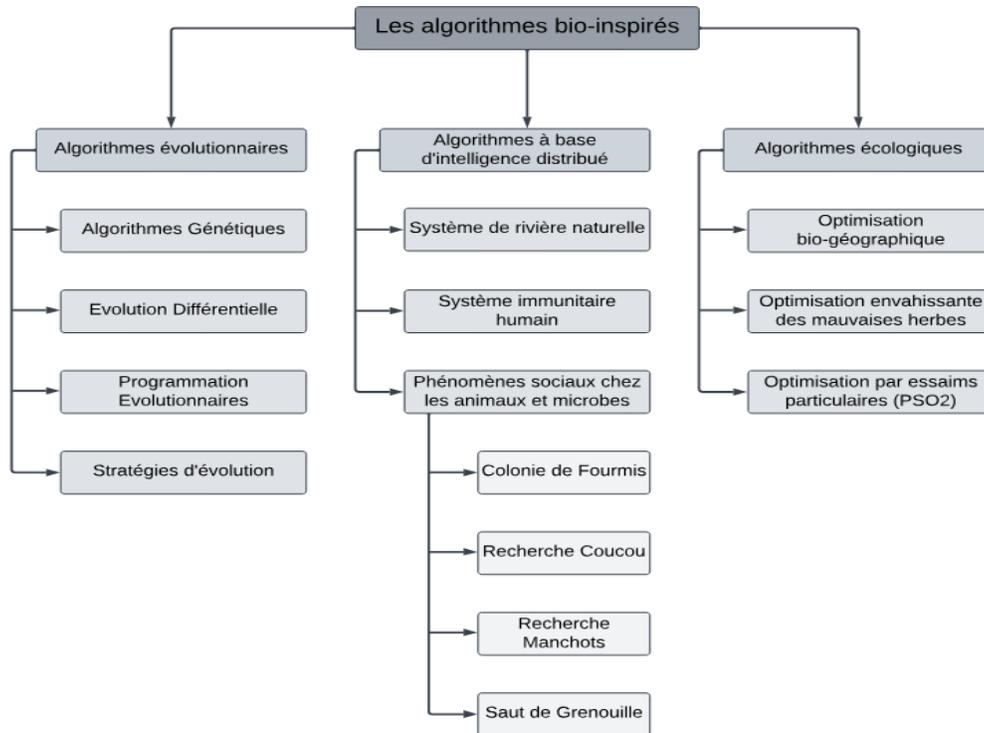


FIG. 3.2 – Taxonomie des algorithmes bio-inspirés.

Ces algorithmes adoptent une approche stochastique, où l’optimisation se déroule de manière itérative, avec une prise de décision souvent aléatoire, mais accompagnée d’une fonction d’évaluation des individus appelée fonction de fitness ou fonction objectif [97].

Donc, les algorithmes évolutionnaires pourront être définis comme des techniques qui permettent d’évoluer un ensemble de solutions connu sous le nom de ”population”. Les solutions connues sous le nom « d’individus » sont représentées par leur génotype, qui s’exprime en tant que phénotype. Pour évaluer la performance d’un individu, on ajoute au phénotype la valeur de la fonction de fitness. Parmi ces algorithmes, nous citons : les algorithmes génétiques, l’évolution différentielle, la programmation génétique et les stratégies d’évolution.

Organigramme d’un algorithme évolutionniste

Le fonctionnement fondamental des algorithmes évolutionnistes est résumé par Fogel [98] dans un schéma que nous exposons dans la Figure 3.3. Les différents algorithmes évolutionnaires reposent sur un organigramme basique où l’idée principale est de faire progresser une population de solutions vers d’autres plus performantes en générant de nouvelles solutions.

Plusieurs algorithmes évolutionnistes ont été suggérés depuis les années 60 [97]. Parmi les divers algorithmes évolutionnaires présents dans la littérature, nous exposerons ci-dessous deux familles, à savoir les algorithmes génétiques et l’évolution différentielle.

Les algorithmes génétiques GA

1. **Source d’inspiration** Les algorithmes génétiques (GA) sont des méthodes d’optimisation basées sur la théorie de l’évolution des espèces de Charles Darwin. Les premières études de John Holland remontent aux années 1960. En 1975, le chercheur a publié un travail sous le titre « Adaptation

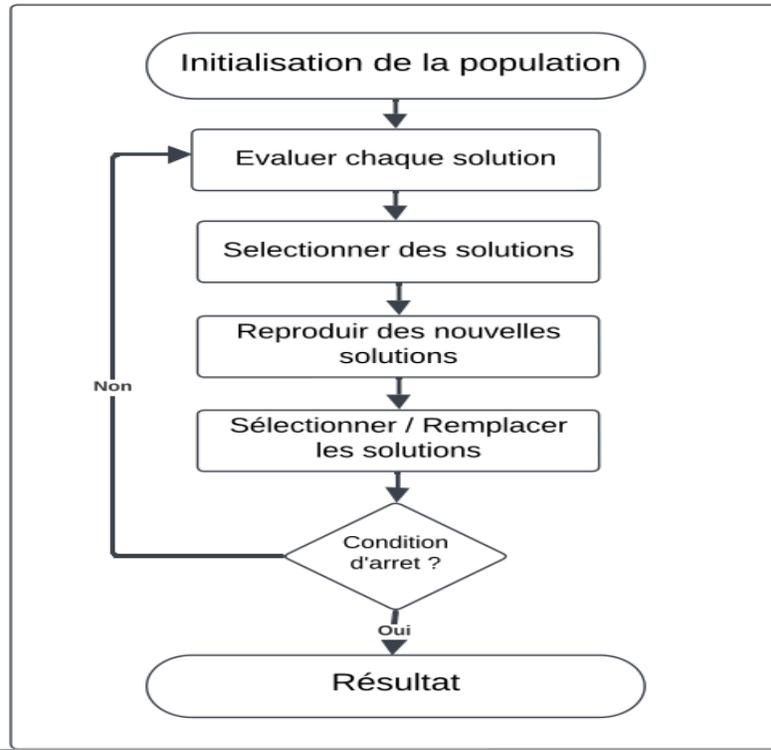


FIG. 3.3 – Organigramme générale d'une méthode évolutionnaire.

in Natural and Artificial Systems » [99]. L'ouvrage de David Goldberg a toutefois joué un rôle majeur dans le développement des algorithmes génétiques [100]. Un algorithme génétique repose sur un groupe d'individus dont chacun représente une solution potentielle du problème. Il faut que chaque solution soit codée. Cette forme codée est connue sous le nom de chromosome, qui est constituée de gènes. La valeur de la fonction objectif correspondante représente le degré d'adaptation d'un individu à l'environnement. Tout au long de l'algorithme génétique, la population est toujours constante. Trois opérateurs sont utilisés pour régler la recherche de la solution. Dans la phase de coopération, les opérateurs de sélection et de croisement sont utilisés, tandis que dans la phase d'adaptation individuelle, un opérateur de mutation est utilisé. Le renouvellement de la population est réalisé en utilisant plusieurs itérations de l'algorithme génétique pour générer de nouvelles générations et en détruire d'autres (mécanisme de sélection naturelle), ce qui permet de créer de nouvelles générations. Les opérateurs de mutation effectuent alors l'exploration de l'espace de recherche, ce qui permet de diversifier les individus de la population (et donc des solutions). Les opérateurs de mutation effectuent alors l'exploration de l'espace de recherche, ce qui permet de diversifier les individus de la population. L'exploitation est assurée par les opérateurs de croisement qui regroupent les solutions pour les améliorer tout en préservant leurs caractéristiques les plus performantes.

2. Fonctionnement

Le déroulement de l'algorithme génétique démarre par une population initiale (parent) de N individus (solutions initiales) qui est choisie aléatoirement. La valeur de la fonction objective $f(x)$ représente le degré d'adaptation d'un individu à l'environnement, où x est la solution que représente un individu. Un individu est d'autant plus adapté à son environnement si la valeur de sa fonction objective est plus basse. Après cette phase d'initialisation, plusieurs approches de sélection d'un ou deux parents génèrent une nouvelle solution par le biais des opérateurs

génétiques : croisement et mutation. Ces opérateurs offrent la possibilité de varier la population au fil des générations et d'explorer d'autres solutions envisageables. Le croisement consiste à reconstituer les gènes des individus déjà présents dans la population. L'objectif de l'opérateur de mutation est d'assurer l'utilisation de l'espace de solutions.

Le processus de sélection d'individus permet de repérer les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les moins performants. La génération suivante désigne la nouvelle population qui est obtenue en sélectionnant N individus parmi les générations parent et enfant. En répétant cette procédure, on génère une population plus abondante en individus moins bons. Le pseudo-code de cette méthode bio-inspirée est illustré dans l'algorithme 1 :

```

1  début
2  | Définition de le fonction objectif  $f(x)$  ,  $x = (x_1, \dots, x_n)$ .
3  | Représentation de la solution sous forme de chromosome.
4  | Génération de la population initiale.
5  | Évaluation de fitness.
6  | Initialiser les probabilité de croisement (pc) et mutation (pm).
7  |  $t \leftarrow 1$ 
8  | tant que ( $t < max_{generation}$ ) faire
9  | | Générer de nouvelle solution par mutation et croisement.
10 | | si ( $p_c > rand$ ) alors
11 | | | Croisement
12 | | fin
13 | | si ( $p_m > rand$ ) alors
14 | | | Mutation
15 | | fin
16 | | Accepter les nouvelles solutions si leur  $f(x)$  est amélioré.
17 | | Choisir les meilleures solutions pour la nouvelle génération.
18 | |  $t \leftarrow t + 1$ 
19 | fin
20 | Décodage et visualisation des solutions.
21 fin

```

Algorithme 1 : Algorithme génétique

L'évolution différentielle DE

1. Source d'inspiration

L'évolution différentielle (en anglais : differential evolution) est de la famille des algorithmes évolutionnaires, c'est une méthode d'optimisation stochastique basée sur la population de solutions, développée par Storn et Price en 1997 [101], dans le but d'améliorer les fonctions à paramètres réels. Cette méthode se distingue par la simplicité et la puissance simultanément. Les stratégies géométriques de recherche de type simplexe de Nelder-Mead ainsi que les algorithmes génétiques sont à l'origine de son inspiration.

Chaque individu est soumis aux opérations de mutation et de croisement, dans le but de faire progresser la population jusqu'à obtenir des solutions acceptables. L'algorithme d'évolution différentielle se distingue des algorithmes génétiques par la façon dont il permet de générer de nouveaux individus [102].

2. Fonctionnement

L'algorithme d'évolution différentielle repose sur une population de solutions candidates qui évoluent au fil des générations par le biais d'opérations de mutation, de croisement et de sélection. Ce processus permet de rechercher progressivement une solution optimale à un problème donné,

en particulier lorsqu'il s'agit de problèmes non linéaires ou complexes. Le fonctionnement de cet algorithme peut être décomposé en plusieurs étapes principales :

- **Initialisation de la population** : l'algorithme commence par la génération aléatoire d'une population initiale composée de plusieurs solutions candidates. Chaque solution représente une configuration possible du problème à résoudre. Ces solutions sont généralement distribuées de manière aléatoire dans l'espace de recherche, afin d'assurer une bonne diversité initiale.
- **Évaluation de la qualité des solutions** : chaque solution de la population est évaluée à l'aide d'une fonction objectif, qui attribue un score reflétant la qualité ou la performance de la solution. Cette évaluation permet de distinguer les solutions les plus prometteuses de celles moins efficaces.
- **Mutation (génération de nouvelles solutions)** : pour chaque solution de la population, une nouvelle solution intermédiaire est générée en combinant plusieurs autres solutions choisies au hasard. Cette opération introduit des variations, dans le but d'explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche. Le mécanisme de mutation est essentiel pour maintenir la diversité au sein de la population et éviter un piégeage prématuré dans un optimum local.
- **Croisement (recombinaison des informations)** : la solution intermédiaire obtenue par mutation est ensuite croisée avec la solution actuelle pour produire une solution d'essai. Cette étape permet d'exploiter les informations existantes en mélangeant les caractéristiques de différentes solutions, tout en conservant une certaine influence de la solution d'origine.
- **Sélection (choix de la meilleure solution)** : la solution d'essai est comparée à la solution actuelle. Si elle présente une meilleure performance selon la fonction objectif, elle remplace l'ancienne solution dans la population. Dans le cas contraire, la solution initiale est conservée. Ce mécanisme garantit que la qualité globale de la population ne se dégrade pas au fil des générations.
- **Itération du processus** : les étapes de mutation, croisement et sélection sont répétées pour chaque individu de la population. Ce cycle se poursuit sur un nombre défini de générations ou jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint (comme l'obtention d'une solution satisfaisante ou la stagnation des résultats).

Considérons un exemple des trois individus sélectionnés aléatoirement $xr_1(k), xr_2(k), xr_3(k) \in \{1, 2, \dots, N\}$ de la population et de la génération k . $xr_1(k), xr_2(k)$ sont sélectionnés aléatoirement et $xr_3(k)$ est actualisé par la formule suivante : $xr'_3(k) = xr_3(k) + \lambda[xr_1(k) - xr_2(k)]$; λ est un poids de mutation $\in [0.5, 1]$;

Afin de rendre les chromosomes plus diversifiés, on utilise un opérateur de croisement pour générer $xr''_3(k+1)$ en combinant aléatoirement $xr_3(k)$ et $xr'_3(k)$. Si $xr''_3(k+1)$ a une meilleure valeur de fitness que $xr_3(k)$, alors $xr_3(k+1) = xr''_3(k+1)$, sinon $xr'_3(k+1)$ est supprimé. Le processus est répété jusqu'à ce que la solution soit améliorée (Figure 3.4).

Le pseudo-code de l'algorithme d'évolution différentielle est donné dans l'algorithme 2

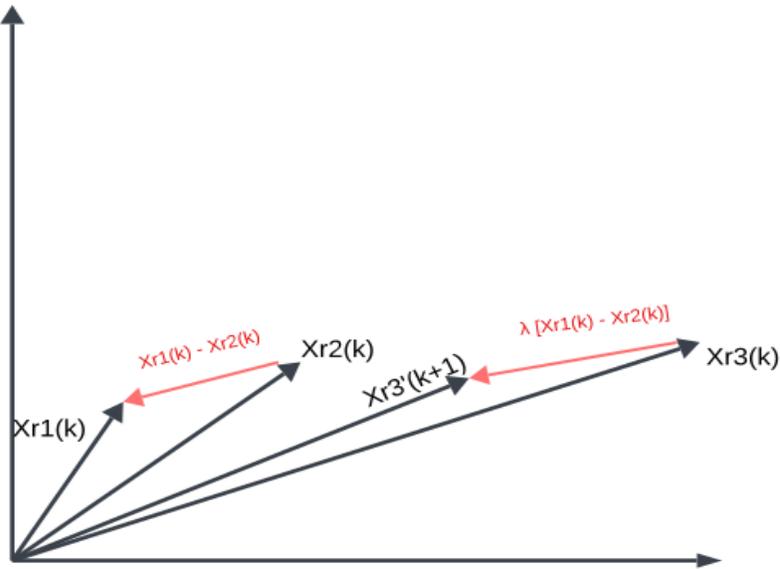


FIG. 3.4 – Principe de l’algorithme d’évolution différentielle.

```

1  début
2  | Définition de la fonction objectif  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_n)$ .
3  | Représentation de la solution sous forme de chromosome.
4  | Génération de la population initiale.
5  | Évaluation de fitness.
6  | Initialiser les probabilité de croisement (pc) et mutation (pm).
7  |  $t \leftarrow 1$ 
8  | tant que ( $t < max_{gnration}$ ) faire
9  | | Créer des individus descendants (offspring)
10 | | Évaluation de fitness
11 | | si (un individu descendant est meilleur que le père) alors
12 | | | Remplacer le dans la prochaine génération.
13 | | fin
14 | |  $t \leftarrow t + 1$ 
15 | fin
16 | Décodage et visualisation des solutions.
17 fin

```

Algorithme 2 : Évolution Différentielle

3.4.2 Algorithmes basés sur l’intelligence distribuée

En anglais, "swarm intelligence", ces algorithmes ont connu un développement considérable depuis le début des années 2000. Ils sont plus récents que les algorithmes évolutionnaires. Ces algorithmes sont principalement basés sur le comportement collectif des animaux, particulièrement chez les insectes. Le comportement collectif de ces espèces est naturel, dans le but de se protéger contre d'autres espèces ou de trouver des ressources nutritionnelles [103]. À la différence des algorithmes évolutionnaires, ces méthodes ne reposent pas sur l'évolution d'une population de solutions, mais sur un travail collectif d'un groupe d'agents à travers des mécanismes de communication pour résoudre des problèmes.

Grâce au comportement social et à un travail collectif, les espèces, comme les abeilles ou les fourmis, parviennent à survivre et à s'adapter à leur environnement. De manière individuelle et avec ce comportement collectif, chaque individu adopte un comportement réactif, aléatoire et que nous ne pouvons pas qualifier d'intelligent. La combinaison de ces comportements individuels réactifs crée un comportement global qui permet au groupe de s'ajuster et de prendre des décisions que nous pouvons qualifier d'intelligentes, en utilisant des mécanismes de communication non centralisés [104]. Ce type d'algorithmes met en œuvre cette intelligence collective afin de gérer des tâches de résolution de problèmes complexes. Il existe plusieurs algorithmes bio-inspirés basés sur l'intelligence distribuée dans la littérature [103]. La majorité sont basés sur les comportements collectifs de groupes d'animaux.

On peut définir les algorithmes basés sur l'intelligence distribuée en se basant sur les cinq principes suivants [96] :

- La proximité : consiste à permettre à la population de réaliser des calculs simples en termes de temps et d'espace.
- La qualité : il est essentiel que la population puisse répondre aux facteurs de qualité de son environnement.
- La réponse diversifiée : consiste à empêcher la population d'effectuer des recherches dans des zones non productives.
- La stabilité : il est important que la population ne modifie pas son comportement en réponse à n'importe quel changement dans son environnement.
- L'adaptabilité : consiste à permettre à la population de modifier ses comportements lorsque cela est bénéfique.

Nous exposons ci-dessous quatre algorithmes importants basés sur l'intelligence distribuée : l'algorithme de colonies de fourmis [105], l'algorithme d'optimisation par essais particuliers [106], l'algorithme de recherche coucou [107] et l'algorithme d'optimisation de L'élevage d'éléphants [108].

Algorithme de colonies de fourmis (ACO)

1. **Source d'inspiration** Les biologistes sont toujours intéressés par le comportement des insectes (fourmis, abeilles et termites). Plusieurs expériences ont montré que les fourmis, en se déplaçant, placent sur leur passage une substance chimique connue sous le nom de « phéromone ». Les fourmis échangent des phéromones entre elles de manière indirecte. La stigmergie est un type de communication indirecte qui permet aux fourmis de communiquer des données sur leur expérience d'exploration. En 1989, [109] ont réalisé une expérience où des fourmis d'Argentine ont été exposées à une source de nourriture reliée à la fourmilière à travers un pont à deux branches de longueurs différentes, comme le montre la Figure 3.5. Après un certain temps, les fourmis, petits insectes, presque aveugles et moins intelligents, étaient capables de suivre toujours le chemin le plus court entre la nourriture et la fourmilière. On a constaté que la probabilité que toutes les fourmis utilisent le chemin le plus court augmentait avec la distance entre les deux branches du pont. La raison pour laquelle Goss observe ce comportement est que les fourmis qui choisissent le chemin le plus court atteignent la source de nourriture et reviennent à la fourmilière plus rapidement que celles qui ont suivi le chemin le plus long. Elles restent toujours odorantes, ce qui rend le chemin emprunté plus attrayante pour les fourmis suivantes. En outre, en raison de l'évaporation de la phéromone au fil du temps, le chemin le plus long est de moins en moins emprunté et sa trace s'évanouit presque totalement. Donc, c'est une boucle positive où la probabilité qu'une fourmi choisisse un chemin augmente avec le nombre de fourmis qui ont déjà choisi ce chemin. On nomme ce phénomène autocatalytique. Les fourmis ont autant de chances de choisir la plus courte que le plus long chemin parce qu'aucune phéromone n'est présente sur

aucun chemin au départ, ce qui explique le temps nécessaire à la stabilisation du système. Les diverses expériences ont conduit à ces observations :

- les insectes ne se limitent pas à vivre en communauté dans une niche écologique en partageant les ressources, mais ils vivent en communauté ;
- chaque entité a une préoccupation pour la survie de l'ensemble, même si elle est entièrement autonome ;
- ces insectes collaborent de manière structurée et leur comportement découle de simples interactions entre eux ;
- ce comportement représente une forme d'optimisation distribuée, où chaque individu peut apporter une contribution minimale ;
- si une fourmi bâtit une solution, ce résultat est issu d'une collaboration globale ;
- la stigmergie est une forme indirecte de communication utilisée par les fourmis ; En se basant sur ces constatations, l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis ACO (Ant Colony Optimization) a été mis en place afin de résoudre les grands problèmes d'optimisation.

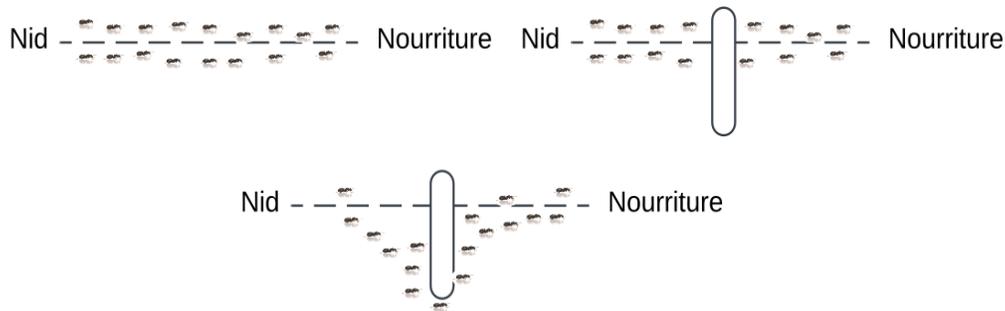


FIG. 3.5 – Illustration du disposition de l'expérience.

2. Fonctionnement

La méthode stochastique d'optimisation par colonie de fourmis ACO (Ant Colony Optimization) est de plus en plus intéressante pour les scientifiques. Elle a démontré sa capacité à résoudre divers problèmes d'optimisation combinatoire NP-complexes. Selon le fondateur de l'ACO Marco Dorigo [110], la recherche d'une ressource alimentaire est similaire à la recherche d'une solution dans un espace de recherche commun. Les fourmis artificielles utilisées par la méthode ACO se distinguent par :

- Chaque fourmi passe d'un état à un autre dans un monde discret ;
- Chaque fourmi possède une mémoire qui renferme l'historique de ses actions ;
- La concentration de phéromones déposée par les fourmis réelles est une valeur enregistrée dans une variable pour les fourmis artificielles ; elle varie en fonction du problème à résoudre.

La diminution de cette valeur est due à l'évaporation des phéromones ;

Le premier algorithme d'optimisation s'inspirant de cette analogie a été proposé pour résoudre la problématique du voyageur de commerce. Son principe général est de tracer des chemins pour un groupe de fourmis, de façon probabiliste en se référant à la mémoire collective (traces de phéromone) et selon une vision locale de la problématique, et ce, pour un certain nombre de cycles (itérations). Initialement, l'algorithme n'était pas conçu pour résoudre des problèmes d'optimisation. Cependant, au fil du temps, il s'est développé et plusieurs variations ont été suggérées pour gérer diverses tâches de résolution de problèmes d'optimisation combinatoire [105].

Pour un problème d'optimisation, l'algorithme ACO élabore de manière incrémentale la solution au problème donné. Chaque mouvement d'une fourmi est un mouvement vers une position proche

dans l'espace de recherche et à l'insertion d'une partie à la solution qui était initialement vide. L'algorithme repose sur deux principes fondamentaux, que nous décrivons ainsi :

- **Processus de construction de la solution** : permet aux fourmis artificielles de se déplacer à travers les différents états de l'espace de recherche en suivant une règle de transition. Les solutions sont créées de manière incrémentale par ces fourmis.
- **Processus de mise à jour des phéromones** : permet de mettre à jour les traces de phéromones. Les actualisations se font soit après la création de solutions complètes, soit à chaque fois que des solutions partielles sont mises à jour. Le mécanisme de l'évaporation des traces de phéromones des solutions moins efficaces est inclus dans cette fonction. Les fourmis sont guidées par l'évaporation lors de leurs déplacements pour oublier les mauvaises solutions élaborées au début de leur recherche.

Le pseudo-algorithme de la méthode ACO est exposé ci-dessous (Algorithme 3) :

```

1 début
2   Initialisation aléatoire des paramètres.
3   Génération de la population initiale.
4   Génération de la matrice des phéromones.
5   tant que (le critère d'arrêt n'est pas rempli) faire
6     Construction de la nouvelle solution.
7     Evaluation de chaque solution.
8     Mettre à jour la matrice des phéromones.
9   fin
10  Afficher la meilleure solution.
11 fin

```

Algorithme 3 : Algorithme de Colonies de Fourmis.

Algorithme d'optimisation par essaims particulaires (PSO)

1. **Source d'inspiration** Selon les chercheurs Russel Eberhart et James Kennedy en 1995, l'optimisation par essaim de particules est une méthode bio-inspirée proposée pour résoudre les problèmes d'optimisation complexes [111]. Cette méthode s'inspire du comportement social des animaux évoluant en essaim, comme les oiseaux migrateurs ou les poissons qui se déplacent en bancs. Les individus de l'essaim ne savent que localement où il se trouve dans l'essaim. Cette information locale et sa mémoire personnelle lui permettent de décider de son cheminement. Des consignes simples, comme « suivre une même voie » ou « rester près de ses voisins », sont assez efficaces pour maintenir la cohésion de l'essaim et favorisent la mise en place de comportements collectifs complexes et flexibles. Effectivement, il est possible d'observer chez ces animaux des mouvements de déplacement assez complexes, tandis que chaque individu a une intelligence limitée et ne connaît que localement sa position dans l'essaim. Il est fort probable que la métaphore la plus pertinente soit celle de l'essaim d'abeilles, notamment parce qu'une abeille qui a découvert un site prometteur sait en informer certaines de ses consœurs et que celles-ci vont prendre en compte cette information pour leur déplacement prochain. L'essaim possède donc une intelligence globale qui découle directement des interactions locales entre les particules de l'essaim. La performance globale du système dépasse la somme des performances de ses différentes parties. Il est possible d'affirmer que ce modèle s'est avéré trop simple pour réellement simuler un comportement social, mais en revanche extrêmement efficace en tant qu'outil d'optimisation de problème.

La méthode bio-inspirée PSO s'inspire des recherches de [112] et [113]. Leurs travaux se sont penchés sur le mouvement de bancs de poissons ou de vols d'oiseaux et ont élaboré des modèles

mathématiques pour les prédire. Le modèle le plus célèbre est probablement celui du vol d'oiseaux BOIDS, créé par C. Reynolds, qui repose sur les règles de comportement suivantes (Figure 3.6).

- La séparation consiste à éviter les voisins trop proches d'un oiseau ;
 - L'alignement consiste à ajuster la direction d'un oiseau en fonction de la moyenne de ses voisins ;
 - La cohésion est une tentative qu'un oiseau se rapproche des voisins trop éloignés.
- Grâce à ces règles, même si elles sont simples, il est possible d'avoir un vol d'oiseaux réaliste sans l'intervention d'un oiseau qui occupe le rôle du leader. On a donc vu apparaître un phénomène complexe.

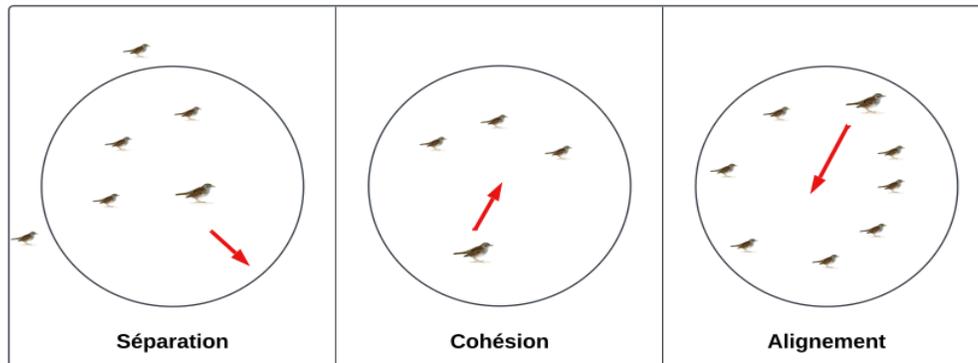


FIG. 3.6 – Règles de comportements du Phénomène : vol d'oiseaux.

2. Fonctionnement

Les comportements socio-psychologiques ont été utilisés par Kennedy et Eberhart pour développer l'algorithme d'optimisation par essaim de particules PSO. En survolant l'espace de recherche, un essaim de particules cherche à atteindre l'optimum global. Ces particules sont des solutions potentielles pour résoudre le problème d'optimisation. Les trois composantes suivantes ont un impact sur le déplacement d'une particule (voir Figure 3.7) :

- La composante physique : la particule a tendance à se déplacer dans sa direction habituelle de déplacement ;
- La composante cognitive : la particule a tendance à se diriger vers le meilleur endroit par lequel elle est déjà passée en utilisant sa propre expérience dans l'essaim ;
- La composante sociale : la particule a tendance à se diriger vers le meilleur endroit déjà atteint par ses voisins, en tirant parti de l'expérience de ceux-ci.

L'algorithme commence par répartir un essaim au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant une position et une vitesse aléatoires. Puis, à chaque instant :

- Chaque particule est capable de mesurer la qualité de sa position et de conserver en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire l'emplacement le plus favorable par lequel elle est déjà passée et auquel elle a tendance à revenir.
- Chaque particule a la capacité d'interroger plusieurs de ses voisins et d'acquérir de chacune d'entre elles sa propre performance idéale. En d'autres termes, chaque particule est consciente de la position la plus favorable connue dans son environnement et elle va chercher à se diriger vers cette position.
- Chaque particule sélectionne la performance la plus élevée dont elle dispose, ajuste sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données, puis se déplace en conséquence. Après avoir identifié la meilleure informatrice, il suffit de combiner linéairement trois tendances pour modifier la vitesse, en utilisant des coefficients de confiance :

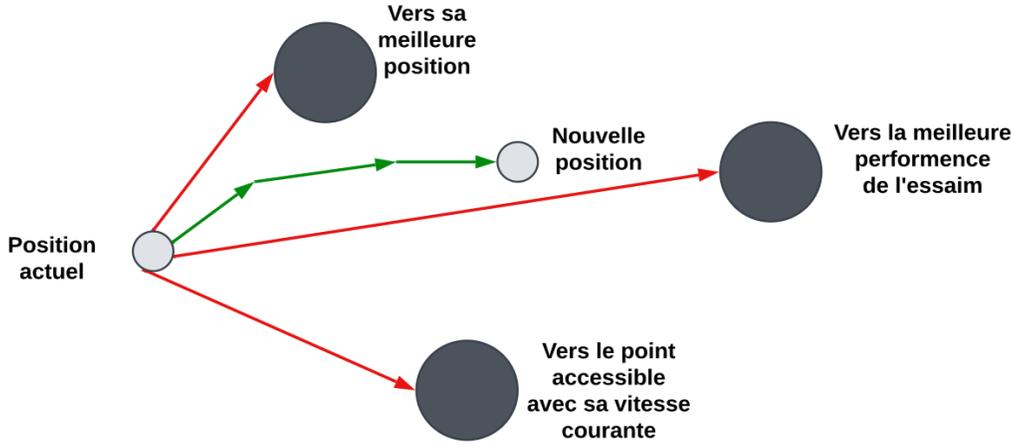


FIG. 3.7 – Mouvement d’une particule.

- La tendance aventureuse, qui implique de poursuivre à la vitesse actuelle ;
- La tendance conservatrice, qui ramène plus ou moins vers la position la plus favorable déjà trouvée,
- La tendance panurgienne, qui guide approximativement vers l’informaticienne la plus compétente.

Un essaim est formellement constitué d’une série de particules. Chaque particule représente une solution dans un espace de recherche de dimension D .

Une particule notée i de l’essaim est représentée par un vecteur de position courante $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})^T$ et un vecteur vitesse de déplacement $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})^T$, avec A^T la transposée d’une matrice A . La valeur de la fonction objectif notée f en ce point définit la qualité de sa position. Toutes les particules enregistrent la meilleure position par laquelle elles sont déjà passées, $pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id}, \dots, pbest_{iD})^T$, ainsi que la position la plus favorable atteinte par les particules voisines de l’essaim, notée $gbest = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_d, \dots, gbest_D)$. Chaque particule se déplacera en fonction de sa vitesse et des deux meilleures positions qu’elle connaît (la sienne et celle de ses voisins) entre les deux itérations t et $t + 1$, selon les deux équations suivantes [114]

$$vid(t + 1) = \omega vid(t) + c1 * r1 * (pbestid(t) - xid(t)) + c2 * r2 * (gbestid(t) - xid(t)) \quad (3.1)$$

$$xid(t + 1) = xid(t) + vid(t + 1) \quad (3.2)$$

ω est généralement une constante connue sous le nom de coefficient d’inertie, tandis que $c1$ et $c2$ sont deux constantes connues sous le nom de coefficients d’accélération. De plus, $r1$ et $r2$ sont deux nombres aléatoires de l’intervalle $[0, 1]$ à chaque itération. Pour chaque dimension, $xid(t)$ et $vid(t)$ expriment respectivement la position et la vitesse de la particule i sur la dimension d à l’instant t , tandis que $pbestid(t)$ et $gbestd(t)$ expriment respectivement la meilleure position obtenue par la particule i et la meilleure position trouvée par l’essaim.

$\omega vid(t)$ représente la composante physique du mouvement. Le paramètre ω gère l’impact de la direction de déplacement sur la prochaine trajectoire.

La relation $c1 * r1 * (pbestid(t) - xid(t))$ est la composante cognitive du déplacement. Le comportement cognitif de la particule est régulé par le paramètre $c1$.

La composante sociale du déplacement est $c2 * r2 * (gbestd(t) - xid(t))$. L’aptitude sociale de la particule est contrôlée par le paramètre $c2$.

On sélectionne le paramètre ω entre 0 et 1, en tenant compte du fait que plus il est proche de 1,

plus l'algorithme privilégiera l'exploration de l'espace des solutions plutôt que l'exploitation et la convergence vers des bonnes solutions.

La localisation de la particule i constitue une réponse au problème à résoudre. $f(x_{id})$ est la valeur de la fonction objectif de la particule i . Il est nécessaire de calculer la fitness de la particule i afin d'évaluer sa qualité. Le pseudo-algorithme de la méthode PSO est exposé ci-dessous (Algorithme 4) :

```

1  début
2  | Initialisation aléatoirement des positions et vitesses de chaque particule.
3  | Evaluation des positions des particules (calcul de la fonction objectif  $f(x_{id})$ ).
4  | pour chaque  $i$  faire  $\overrightarrow{p_{bestid}} = \overrightarrow{x_{id}}$ ;
5  | Calculer  $\overrightarrow{g_{bestid}}$ 
6  | tant que (le critère d'arrêt n'est pas rempli) faire
7  | | Déplacer les particules selon les équations (3.1) et (3.2). etiquette A
8  | | Évaluer la valeur de  $f(x_{id})$  de chaque particule.
9  | | Mettre à jour  $\overrightarrow{p_{bestid}}$  et  $\overrightarrow{g_{bestid}}$ 
10 | | si ( $f(x_{id}) > f(p_{bestid})$ ) alors
11 | | |  $p_{bestid} = x_{id}$ 
12 | | fin
13 | | si ( $f(p_{bestid}) > f(g_{bestid})$ ) alors
14 | | |  $g_{bestid} = p_{bestid}$ 
15 | | fin
16 | fin
17 | Afficher la meilleure valeur trouvée  $\overrightarrow{g_{bestid}}$ 
18 fin

```

Algorithme 4 : Optimisation par Essaims Particulaires.

Le format binaire : En 1997, [115] ont présenté la première version de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire binaire (PSOB). La position de la particule i est représentée par une succession de bits dans le PSOB. L'équation (3.3) permet de calculer la vitesse v_{id} de la particule i . La fonction *sigmoid* est utilisée pour convertir un ensemble de réels v_{id} en un ensemble de probabilités.

$$sig(v_{id}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id})} \quad (3.3)$$

$sig(v_{id})$ correspond à la probabilité que le bit x_{id} prenne la valeur 1. Afin d'éviter la divergence de l'essaim, la vitesse v_{id} est habituellement restreinte par une valeur maximale V_{max} et une valeur minimale $-V_{max}$. On actualise la position x_{id} de la particule i de la manière suivante :

$$x_{id} = \begin{cases} 1 & \text{si } r < sig(v_{id}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où r est une valeur aléatoire de l'intervalle $[0, 1[$.

Deux problèmes majeurs de paramètres se posent dans l'algorithme standard du PSOB [116]. Tout d'abord, la vitesse a un impact différent sur la version continue du PSO par rapport à la version binaire. Dans la version continue du PSO, la vitesse maximale de la particule favorise l'exploration. Cependant, dans la version binaire du PSO, la vitesse maximale de la particule restreint l'exploitation. La seconde difficulté réside dans le choix difficile de la valeur appropriée du coefficient d'inertie ω . En fait, la convergence est entravée par $\omega < 1$.

Algorithme d'optimisation de l'élevage des éléphants

1. Source d'inspiration

L'optimisation de L'élevage d'éléphants EHO (proposée par Wang à la fin de 2015) est une méthode de recherche méta-heuristique fondée sur un essaim intelligent, pour résoudre des problèmes d'optimisation. L'algorithme s'inspire de la simulation du comportement grégaire des éléphants dans leur habitat naturel (voir Figure 3.8). On peut résumer le comportement grégaire de la manière suivante :

- Les essaims (groupes) d'éléphants, connus sous le nom de clans, sont formés de plusieurs sous-ensembles comprenant des éléphants mâles et femelles.
- Chaque clan se déplace sous la direction d'une matriarche (matriarque) (le leadership est l'éléphant femelle adulte).
- Les veaux mâles qui atteignent l'âge adulte se séparent du groupe auquel ils appartiennent.

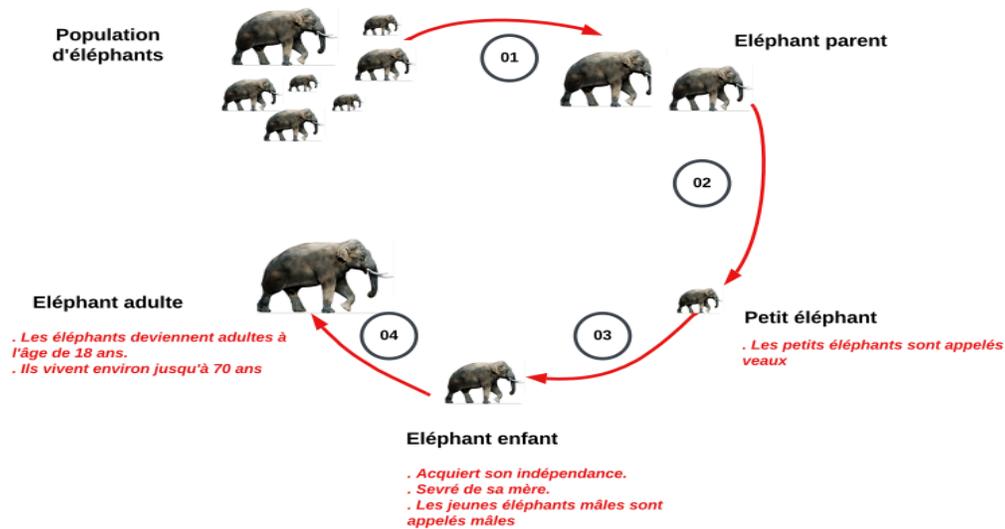


FIG. 3.8 – Cycle de vie d'un éléphant.

Les éléphants sont des animaux sociaux qui vivent dans la nature. Ils ont des structures sociales complexes impliquant des femelles et des éléphanteaux. Un groupe d'éléphants est composé de plusieurs clans, dirigés par une matriarche, souvent la femelle la plus âgée.

Un clan se compose d'une femelle et de ses éléphanteaux ou de certaines femelles apparentées. Les femelles ont une préférence pour la vie en famille, tandis que les éléphants mâles ont l'habitude de mener une existence plus solitaire, en s'éloignant de leur groupe familial une fois qu'ils atteignent un certain âge. Malgré la distance qui sépare les éléphants mâles de leur famille, ils ont la possibilité de maintenir un lien avec les membres de leur clan grâce à des vibrations de basse fréquence [117].

2. Fonctionnement

Les comportements d'élevage des éléphants sont modélisés par l'algorithme bio-inspiré EHO en deux opérations :

(a) Détermination de l'opérateur de mise à jour du clan

Chaque clan est dirigé par une matriarche (matriarque), et tous les éléphants cohabitent sous sa direction. Ainsi, pour chaque éléphant du clan noté c_i , sa position future est déterminée par la matriarche de ce même clan. Concernant l'éléphant noté j du clan c_i , une mise à jour

peut être effectuée de la manière suivante (formule (3.4)) :

$$x_{new,c_i,j} = x_{c_i,j} + \alpha * (x_{best,c_i} - x_{c_i,j}) * r \quad (3.4)$$

où $x_{new,c_i,j}$ et $x_{c_i,j}$ représentent respectivement la position récemment actualisée et l'ancienne position de l'éléphant j au sein du clan c_i . $\alpha \in [0, 1]$; c'est un facteur d'échelle qui détermine l'impact de la matriarche c_i sur $x_{c_i,j}$. x_{best,c_i} symbolise la matriarche c_i , celle qui est la plus apte à devenir éléphant dans le clan c_i . $r \in [0, 1]$.

Ici, on emploie une distribution uniforme. L'éléphant le plus apte de chaque clan ne peut pas être actualisé par l'équation précédente, c'est-à-dire que $x_{c_i,j} = x_{best,c_i}$. Concernant l'éléphant le plus apte, il pourrait être actualisé par la formule suivante :

$$x_{new,c_i,j} = \beta * x_{center,c_i} \quad (3.5)$$

où $\beta \in [0, 1]$ est un coefficient qui définit l'impact du x_{center,c_i} sur $x_{new,c_i,j}$. Il est évident que le nouvel élément $x_{new,c_i,j}$ dans l'équation (3.5) précédente est généré à partir des données recueillies auprès de tous les éléphants du clan c_i . x_{center,c_i} représente le centre du clan c_i , et pour la d -ième dimension, sa détermination peut se faire de la manière suivante :

$$x_{center,c_i,d} = \frac{1}{n_{c_i}} * \sum_{j=1}^{n_{c_i}} x_{c_i,j,d} \quad (3.6)$$

où $1 \leq d \leq D$ représente la d -ième dimension, et D correspond à la dimension totale. n_{c_i} représente le total d'éléphants appartenant au clan c_i . $x_{c_i,j,d}$ représente le d -ième élément de donnée pour l'individu éléphant $x_{c_i,j}$. Le centre du clan c_i , noté x_{center,c_i} , peut être déterminé à l'aide des calculs D selon l'équation (3.6), en se basant sur la description précédente.

(b) **Calcul de l'opérateur de séparation**

Les éléphants mâles quittent leur groupe d'éléphants familial et vivent seuls lorsqu'ils atteignent la puberté. Ce processus de séparation peut être modélisé par un opérateur de séparation lors de la résolution de problèmes d'optimisation. Pour optimiser davantage la méthode EHO, imaginons que les éléphants en mauvaise condition physique appliquent l'opérateur de séparation à chaque génération, comme l'illustre l'équation (3.7)

$$x_{worst,c_i} = x_{min} + (x_{max} - x_{min} + 1) * rand \quad (3.7)$$

où x_{max} et x_{min} représentent respectivement les extrêmes supérieur et inférieur de la localisation de l'éléphant. x_{worst,c_i} , c'est l'éléphant le plus détestable du clan c_i (pire éléphant). $rand \in [0, 1]$ représente une sorte de distribution stochastique et constitue une distribution uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$.

(c) **Mémorisation de la meilleure solution courante**

Les valeurs de fitness sont évaluées pour la population en fonction des positions récemment actualisées. Classifier l'ensemble de la population en fonction des nouvelles règles de faisabilité, puis sauvegarder la meilleure solution avec la valeur de fitness optimale. L'éléphant le plus performant est transmis à la génération suivante en tant que premier éléphant.

(d) **Critères d'arrêt**

L'algorithme EHO (voir Algorithme 5) se termine si la condition d'arrêt est satisfaite ou si le cycle variable atteint le nombre maximum d'itérations.

```

1 début
2   Générer aléatoirement la population initiale.
3   Définir la génération maximale  $Max_{Gen}$ 
4   tant que (le critère d'arrêt n'est pas rempli) faire
5     Trier la population en fonction de la forme physique des individus.
6     pour tous les (clans  $c_i$ ) faire
7       pour chaque (éléphant  $j$  dans le clan  $c_i$ ) faire
8         Générer  $x_{new}, c_{i,j}$  et mettre à jour  $x_{c_{i,j}}$  par l'équation (3.5)
9         si ( $x_{c_{i,j}} = x_{best,c_i}$ ) alors
10          Générer  $x_{new}, c_{i,j}$  et mettre à jour  $x_{c_{i,j}}$  par l'équation (3.6)
11          fin
12        fin
13      fin
14    pour tous les (clans  $c_i$ ) faire
15      Remplacer le pire individu  $c_i$  par l'équation (3.7)
16    fin
17    Évaluer chaque individu éléphant en fonction de sa position.
18     $T \leftarrow T + 1$ 
19  fin
20 fin

```

Algorithme 5 : Optimisation de l'élevage des éléphants.

Algorithme d'optimisation de recherche coucou CSA

1. Source d'inspiration

L'algorithme bio-inspiré de recherche coucou a été développé par [118]. Il s'agit d'un des types d'optimisation par essaim particulière PSO. La méta-heuristique basée sur la population fonctionne dans des espaces de recherche continus. Son mode de reproduction est inspiré du comportement d'une espèce particulière d'oiseaux parasites de nids, le coucou. Yang et Deb ont développé la méthode d'optimisation de recherche coucou en se référant au comportement parasitaire des oiseaux coucous et au mécanisme du vol de Lévy, qui permet de modéliser mathématiquement les déplacements aléatoires. Cette méthode repose sur trois principes suivants :

- Le coucou pond un unique œuf simultanément. Il le place dans un nid qu'il sélectionne au hasard. Chaque œuf présent dans un nid symbolise une solution, tandis qu'un œuf de coucou symbolise une nouvelle solution.
- Les élus qui développent les membres de la nouvelle génération sont les meilleurs nids qui contiennent des œufs de qualité supérieure.
- On fixe préalablement un nombre de nids hôtes. Le coucou étranger peut être repéré par l'oiseau hôte avec la probabilité $Pr_a \in [0, 1]$. Dans cette situation, l'oiseau hôte hésite entre écarter le coucou de son nid en l'éjectant hors nid ou abandonner son nid pour en construire un autre dans un nouvel emplacement.

La probabilité Pr_a correspond à la proportion de N nids qui seront remplacés par de nouveaux (avec de nouveaux choix aléatoires dans de nouveaux emplacements dans l'espace de recherche). L'évaluation de la qualité d'un nid ou d'une solution est basée sur la fonction objectif qui diffère d'un problème à l'autre [118].

Beaucoup de phénomènes naturels ou sociaux peuvent être expliqués par des phénomènes aléatoires, par exemple, la diffusion de la lumière dans le brouillard ou de la chaleur dans un gaz, la recherche de nourriture chez les animaux, etc. La recherche de nourriture chez les animaux est

en effet un processus aléatoire. En réalité, leur mouvement dépend de leur position actuelle et d'une probabilité de départ vers une autre. Des recherches expérimentales sur le comportement de certains animaux et insectes ont démontré que leur comportement peut être représenté par un schéma mathématique appelé vol de Lévy (proposé par le mathématicien français Paul Pierre Lévy). Le vol de Lévy offre la possibilité de représenter des marches aléatoires constituées d'un grand nombre de pas où les transitions sont déterminées par des probabilités. Mathématiquement, le vol de Lévy est une marche aléatoire (une représentation mathématique d'une trajectoire constituée d'un ensemble de pas aléatoires) où la distance entre les pas est une distribution probabilitaire (une fonction qui représente la probabilité d'un nombre aléatoire de prendre une valeur donnée) à queue-lourde (dont les queues ne sont pas bornées de manière exponentielle) [94].

Dans l'algorithme CS, Yang et Deb ont incorporé le vol de Lévy pour exploiter sa capacité à générer des solutions suffisamment variées de la façon suivante :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus Levy(\lambda) \quad (3.8)$$

Lorsque $\alpha > 0$, la taille du pas est associée au problème abordé. Dans la majorité des cas, il est possible d'utiliser $x_i^{t+1} = 1$. La génération de la nouvelle solution x_i^{t+1} sera donc basée sur deux facteurs essentiels :

- L'emplacement actuel du coucou : x_i^t .
- Mesure de la nouvelle direction par le vol de Lévy : $\alpha \oplus Levy(\lambda)$.
Les pas aléatoires du vol de Lévy sont déterminés à partir de la distribution de Lévy. Il convient de souligner que la distribution de Lévy présente une multitude de variations avec une panoplie de sens.

2. Fonctionnement

L'algorithme de recherche coucou (CSA) se déroule en plusieurs phases (voir algorithme 2.6). Dans un premier temps, l'algorithme commence par la création d'une population de nids, où chaque nid renferme une solution aléatoire, représentant ainsi un œuf dans l'espace de recherche. Par la suite, chaque solution est évaluée en termes de qualité en utilisant la fonction objectif, ce qui donne une valeur de fitness à chaque œuf. L'algorithme produit de nouvelles solutions à chaque itération en utilisant un mouvement de Lévy pour reproduire le comportement aléatoire des coucous. Cela offre la possibilité d'explorer de manière globale tout en améliorant les solutions locales. Si la solution récente est supérieure à l'ancienne, elle remplace l'œuf dans le nid. En même temps, plusieurs œufs sont éliminés de manière aléatoire avec une probabilité de Pr_a , cela permet de préserver la diversité de la population et d'éviter une convergence prématurée. Les œufs éliminés sont ensuite remplacés par de nouvelles solutions créées de façon aléatoire. L'exploration, le remplacement et la suppression des mauvaises solutions sont effectués à plusieurs reprises ou jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, tels que le nombre maximal d'itérations ou l'obtention d'une solution idéale. L'un des principaux atouts de cet algorithme réside dans sa simplicité. En comparaison avec d'autres méta-heuristiques basées sur la population, comme l'optimisation par essaim de particules PSO, le CSA comporte moins de paramètres. Ainsi, il est extrêmement simple à mettre en place. Il présente une plus grande étendue et une efficacité accrue pour une variété de problèmes d'optimisation. De plus, il présente un équilibre satisfaisant entre l'exploitation et l'exploration de l'espace de recherche et il peut être encore combiné avec d'autres algorithmes bio-inspirés. Le pseudo-algorithme 6 de la méthode CSA est exposé ci-dessous :

```

1 début
2   Initialisation de la population de nid hôte.
3   Évaluation des solutions (chaque œuf dans la population).
4   tant que (le critère d'arrêt n'est pas rempli) faire
5     Obtention d'un coucou par le mouvement aléatoire de Lévy.
6     Évaluation de la fitness de coucou.
7     Choix d'un nid aléatoirement.
8     si ( $f(\text{coucou}) > f(\text{nid})$ ) alors
9       | Remplacement du nid par le coucou.
10    fin
11    pour chaque (fraction  $Pr_a$  de mauvais nid  $s$ ) faire
12      | Création d'un nid  $g$  dans un emplacement nouveau via le vol de Lévy.
13      | Évaluation de la fitness de  $g$ .
14      | si ( $f(g) > f(s)$ ) alors
15        | Remplacement  $g$  par  $s$ .
16      | fin
17    fin
18    Maintenir les meilleures solutions.
19    Classement des solutions.
20  fin
21  Afficher la meilleure solution.
22 fin

```

Algorithme 6 : Algorithme de Recherche Coucou .

Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielle (Artificial Bee Colony, ABC) est un algorithme d'optimisation méta-heuristique introduit par Dervis Karaboga en 2005. Il s'inscrit dans la famille des algorithmes bio-inspirés, et plus précisément dans les approches fondées sur l'intelligence collective observée dans la nature. L'ABC simule le comportement adaptatif des colonies d'abeilles à miel lors de la recherche et de l'exploitation des sources de nourriture, en mettant en œuvre des mécanismes coopératifs de prise de décision distribuée [119].

Conçu à l'origine pour résoudre des problèmes d'optimisation numérique continue, l'algorithme ABC s'est révélé être une méthode simple, robuste et efficace, capable de s'adapter à différents types de problèmes, y compris les problèmes combinatoires, discrets et multi-objectifs. Sa popularité croissante est en grande partie due à sa capacité à trouver un bon équilibre entre exploration de l'espace de recherche (découverte de nouvelles solutions) et exploitation des connaissances acquises (amélioration des solutions existantes).

1. Source d'inspiration

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielle (ABC) s'inspire du comportement naturel des abeilles à miel (*Apis mellifera*) dans leur processus de recherche de nourriture. Ce comportement repose sur une forme d'intelligence collective, dans laquelle les abeilles communiquent et coopèrent afin de localiser, évaluer et exploiter efficacement les ressources présentes dans leur environnement. Au sein d'une colonie, les abeilles ouvrières jouent un rôle central dans ce processus. Lorsqu'elles découvrent une source de nourriture (fleurs contenant du nectar), elles retournent à la ruche et effectuent une danse particulière, appelée waggles dance, pour transmettre aux autres abeilles des informations précises sur la localisation et la qualité de la source. La qualité est généralement évaluée en fonction de la concentration en sucre du nectar.

Ces informations influencent le comportement des autres abeilles, appelées abeilles observatrices, qui choisissent ensuite les sources à explorer en fonction de leur attractivité. En parallèle, certaines abeilles agissent comme éclaireuses (scout bees) et recherchent de nouvelles sources de manière aléatoire, introduisant ainsi un mécanisme de diversité dans la stratégie globale de recherche de la colonie.

Ce modèle naturel présente deux caractéristiques fondamentales qui inspirent l’algorithme ABC :

- Une exploitation adaptative des sources les plus prometteuses grâce à une communication efficace ;
- Une exploration continue de l’environnement pour éviter la stagnation et découvrir de meilleures opportunités.

L’algorithme ABC transpose ces mécanismes naturels dans un cadre informatique afin de résoudre des problèmes d’optimisation en imitant le comportement coopératif des abeilles.

2. Fonctionnement

L’algorithme ABC repose sur la simulation de trois types d’abeilles artificielles : ouvrières, observatrices et éclaireuses, chacune remplissant une fonction spécifique dans le processus d’optimisation. La population d’abeilles travaille collectivement sur un ensemble de solutions candidates (appelées sources de nourriture), évaluées selon une fonction objectif à optimiser. L’algorithme se déroule en plusieurs cycles, chacun constitué de trois phases principales [120] :

(a) Production de sites initiaux de sources de nourriture

Si l’on considère l’espace de recherche comme l’environnement d’une ruche contenant différents sites de sources de nourriture, l’algorithme débute par la génération aléatoire de ces sites, représentant les solutions possibles dans cet espace. Les sources de nourriture initiales sont ainsi créées de manière aléatoire, tout en respectant les bornes définies pour les paramètres.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0, 1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.9)$$

où $i = 1 \dots SN$ et $j = 1 \dots D$, avec SN représentant le nombre de sources de nourriture et D le nombre de paramètres d’optimisation. De plus, les compteurs, qui enregistrent le nombre d’essais de solutions, sont réinitialisés à 0 au cours de cette phase.

Une fois l’initialisation effectuée, la population de sources de nourriture (ou solutions) est soumise à des cycles répétés de recherche effectués par les abeilles employées, les abeilles observatrices et les abeilles éclaireuses. Les critères d’arrêt de l’algorithme ABC peuvent inclure l’atteinte d’un nombre maximal de cycles (MCN) ou la satisfaction d’une tolérance d’erreur (ϵ).

(b) Envoi des abeilles employées vers les sites sources

Comme indiqué précédemment, chaque abeille employée est associée à un seul site de source de nourriture. Ainsi, le nombre de sites de sources de nourriture est équivalent au nombre d’abeilles employées. Une abeille employée modifie la position de sa source de nourriture (solution) dans sa mémoire en s’appuyant sur les informations locales (informations visuelles), puis explore une source de nourriture voisine pour en évaluer la qualité. Dans l’algorithme ABC, la recherche d’une source de nourriture voisine est définie par l’équation (3.10).

$$v_{ij} = x_{ij} + \theta_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.10)$$

Dans le voisinage de chaque site de source de nourriture représenté par x_i , une source de nourriture v_i est déterminée en modifiant un paramètre de x_i . Dans l’équation (3.10), j est un entier aléatoire compris entre $[1, D]$, et $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ est un indice choisi aléatoirement, qui doit être différent de i . θ_{ij} est un nombre réel aléatoire uniformément distribué dans l’intervalle $[-1, 1]$.

Comme le montre l'équation (3.10), lorsque la différence entre les paramètres $x_{i,j}$ et $x_{k,j}$ diminue, la perturbation sur la position $x_{i,j}$ se réduit également. Ainsi, à mesure que la recherche s'approche de la solution optimale dans l'espace de recherche, la taille du pas est ajustée de manière adaptative.

Si une valeur de paramètre générée par cette opération dépasse les limites prédéfinies, elle peut être ajustée à une valeur acceptable. Dans ce travail, lorsqu'un paramètre dépasse ses limites, il est fixé à la valeur maximale ou minimale autorisée. Ainsi, si $x_i > x_i^{max}$, alors $x_i = x_i^{max}$; si $x_i < x_i^{min}$, alors $x_i = x_i^{min}$.

Après avoir généré v_i dans les limites, une valeur d'aptitude pour un problème de minimisation peut être attribuée à la solution v_i selon l'équation (3.11).

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i}, & \text{si } f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i), & \text{si } f_i < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Où f_i est la valeur de cout de

Où f_i est la valeur de coût de la solution t_i . Pour les problèmes de maximisation, la fonction de coût peut être directement utilisée comme fonction d'aptitude. Une sélection gourmande est effectuée entre x_i et t_i , et la meilleure solution est choisie en fonction des valeurs d'aptitude, représentant la quantité de nectar des sources de nourriture aux points x_i et t_i . Si la source à t_i est plus rentable que celle à x_i , l'abeille employée mémorise la nouvelle position et oublie l'ancienne. Sinon, la position précédente est conservée en mémoire. Si x_i ne peut pas être amélioré, son compteur d'essais est incrémenté de 1; sinon, il est réinitialisé à 0.

(c) **Calcul des valeurs de probabilité**

Une fois que toutes les abeilles employées ont terminé leurs recherches, elles partagent leurs informations concernant les quantités de nectar et les positions de leurs sources avec les abeilles observatrices sur l'aire de jeu. C'est ce qu'on appelle l'interaction multiple des abeilles artificielles dans l'algorithme ABC. Chaque abeille observatrice évalue les informations sur le nectar collectées par toutes les abeilles employées et sélectionne un site de source de nourriture en fonction d'une probabilité liée à la quantité de nectar. Cette sélection probabiliste dépend des valeurs d'aptitude des solutions dans la population. Un schéma de sélection basé sur l'aptitude peut être une roulette, un classement, un échantillonnage universel stochastique, une sélection par tournoi, ou tout autre schéma de sélection. Dans l'algorithme ABC de base, un schéma de sélection de type roulette est utilisé, où chaque tranche est proportionnelle à la valeur d'aptitude, comme décrit par l'équation (3.12).

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{SN} fitness_i} \quad (3.12)$$

Dans ce schéma de sélection probabiliste, à mesure que la quantité de nectar des sources de nourriture (ou l'aptitude des solutions) augmente, le nombre d'abeilles observatrices les visitant augmente également. Cela représente la fonction de rétroaction positive de l'algorithme ABC.

(d) **Choix du site source à améliorer par les spectatrices**

Dans l'algorithme ABC, un nombre réel aléatoire compris entre 0 et 1 est généré pour chaque source. Si la valeur de probabilité p_i (dans l'équation (3.12)) associée à cette source est supérieure à ce nombre aléatoire, l'abeille observatrice modifie la position de cette source en utilisant l'équation (3.10), de la même manière qu'une abeille employée. Une fois la source évaluée, une sélection gourmande est effectuée, et l'abeille observatrice mémorise la nouvelle position, tout en oubliant l'ancienne, ou conserve l'ancienne position si elle est préférable. Si la solution x_i ne peut pas être améliorée, son compteur d'essais est incrémenté de 1; sinon,

il est réinitialisé à 0. Ce processus se répète jusqu'à ce que toutes les abeilles observatrices soient réparties sur les différents sites de sources de nourriture.

(e) **Critères d'abandon : Limitation et surveillance de la production**

Dans chaque cycle, une fois que toutes les abeilles employées et observatrices ont terminé leurs recherches, l'algorithme vérifie si certaines sources sont épuisées et doivent être abandonnées. Pour déterminer si une source doit être abandonnée, les compteurs mis à jour pendant la recherche sont utilisés. Si la valeur d'un compteur dépasse le paramètre de contrôle de l'algorithme ABC, appelé « limite », alors la source associée à ce compteur est considérée comme épuisée et abandonnée. La source abandonnée par son abeille est remplacée par une nouvelle source de nourriture découverte par l'abeille éclaireuse, illustrant ainsi le mécanisme de rétroaction négative et la propriété de fluctuation dans l'auto-organisation d'ABC. Ce processus est simulé en générant aléatoirement une nouvelle position de site, qui remplace celle de la source abandonnée. Supposons que la source abandonnée soit x_i , l'éclaireuse découvre alors aléatoirement une nouvelle source de nourriture pour remplacer x_i . Cette opération peut être définie comme dans l'équation (3.9). Dans l'algorithme ABC de base, on suppose qu'une seule source est épuisée par cycle et qu'une seule abeille employée agit comme éclaireuse. Si plusieurs compteurs dépassent la valeur « limite », l'une des sources ayant le compteur maximum peut être sélectionnée de manière programmée.

Le pseudo-algorithme de la méthode ABC est exposé ci-dessous (Algorithm 7) :

3.4.3 Algorithmes écologiques

Plusieurs algorithmes d'optimisation sont basés sur les divers écosystèmes qui constituent le monde naturel. On peut mentionner parmi ces algorithmes les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes basés sur l'intelligence distribuée, que nous avons déjà exposés. D'autres types d'algorithmes peuvent être inspirés par d'autres écosystèmes et comportements dans la nature, notamment les interactions et échanges entre les organismes vivants dans leur milieu.

Selon [96], ces interactions peuvent se produire entre différentes espèces ou entre des agents de la même espèce, voire même entre des agents d'une espèce et son environnement naturel (sol, eau, air, etc). Grâce aux interactions complexes entre divers organismes, il a été possible de proposer des algorithmes d'optimisation qui ont un fonctionnement plus complexe que ceux des autres.

Les interactions peuvent être coopératives dans la nature, comme c'est le cas pour les animaux en troupe où les tâches sont divisées et accomplies de manière collective. Il est également possible que ces interactions soient compétitives, comme c'est le cas pour les organismes qui tirent parti des autres espèces, comme c'est le cas pour les bactéries. Parmi les méthodes écologiques, nous pouvons citer l'optimisation basée sur la bio-géographie (BBO), l'appel des grenouilles japonaises, la pollinisation des fleurs (FPA), l'algorithme de champ de riz (PFA), l'algorithme de saut de grenouille mélangé (SFLA) [121].

Nous présenterons dans ce qui suit un algorithme inspiré du processus écologique de la colonisation et de l'évolution des mauvaises herbes dans leur environnement [122].

Algorithme de colonisation et d'évolution des mauvaises herbes IWO

1. **Source d'inspiration** Comme les mauvaises herbes proviennent des plantes réelles et de la science de l'informatique, leur vocabulaire combine des expressions naturelles et artificielles. Elle se sert d'une communauté ou d'une colonie de plantes ; chacune offre une solution sous forme d'une chaîne réelle ou binaire [122]. Le codage réel est actuellement le plus couramment employé afin d'éviter le codage-décodage lors de l'optimisation. Une fonction de coût (fonction de fitness) est utilisée pour évaluer ces chaînes, qui renferment toutes les informations sur le problème à

```

1 début
2   Initialisation :
3   Générer aléatoirement  $SN$  sources de nourriture  $x_i, i = 1, \dots, SN$ , selon (3.9).
4   Initialiser les compteurs  $trial_i \leftarrow 0$ .
5   Évaluer la fitness  $f(x_i)$  de chaque source.
6   tant que (le critère d'arrêt n'est pas satisfait) faire
7     Phase des abeilles employées :
8     pour chaque (chaque source de nourriture  $x_i$ ) faire
9       Générer une solution voisine  $v_i$  en utilisant (3.10).
10      Évaluer  $f(v_i)$ .
11      si  $f(v_i) > f(x_i)$  alors
12        |  $x_i \leftarrow v_i, \quad trial_i \leftarrow 0$ 
13      fin
14      sinon
15        |  $trial_i \leftarrow trial_i + 1$ 
16      fin
17    fin
18    Phase des abeilles observatrices :
19    Calculer les probabilités  $p_i$  selon (3.12).
20    pour chaque (chaque abeille observatrice) faire
21      Sélectionner une source  $x_i$  selon  $p_i$ .
22      Générer une solution voisine  $v_i$  via (3.10).
23      Évaluer  $f(v_i)$  et effectuer une sélection gourmande.
24      Mettre à jour  $x_i$  et  $trial_i$  en conséquence.
25    fin
26    Phase des abeilles éclaireuses :
27    pour chaque (chaque source  $x_i$  où  $trial_i > limit$ ) faire
28      Remplacer  $x_i$  par une nouvelle source aléatoire selon (3.9).
29       $trial_i \leftarrow 0$ 
30    fin
31    Mémoriser la meilleure solution trouvée.
32  fin
33  Retourner la meilleure solution.
34 fin

```

Algorithme 7 : Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle (ABC)

résoudre. Au fur et à mesure que la valeur de la fonction de fitness augmente, la solution codée par la plante est plus adaptée à l'environnement.

2. Fonctionnement

Par rapport aux méthodes évolutionnaires classiques (GA, ED, etc) et aux méthodes stochastiques traditionnelles, l'algorithme IWO est plus récent. Il repose sur le comportement de colonisation des mauvaises herbes dans la nature. Les plantes adventices pénètrent dans un champ et se dispersent aléatoirement, occupent l'espace libre autour de ce champ, puis s'y développent pour pousser des graines et produire de nouvelles mauvaises herbes, et ainsi de suite.

L'aptitude de la mauvaise herbe à fleurs dans la colonie détermine le nombre de nouvelles graines produites par chaque mauvaise herbe à fleurs. Grâce à un plan plus respectueux de l'environnement et à une plus grande disponibilité de ressources, les mauvaises herbes se développent plus rapidement et produisent plus de graines.

Les graines obtenues sont dispersées de manière aléatoire sur le champ et deviennent des mauvaises herbes à fleurs. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les mauvaises herbes dans le champ atteignent le nombre maximum en raison des ressources limitées. Seules les mauvaises herbes les plus adaptées peuvent survivre et engendrer de nouvelles mauvaises herbes après avoir été comptées. Cela favorise l'adaptation et le développement efficace au fil du temps des mauvaises herbes. La fonction de coût d'une plante donnée détermine le nombre de graines produites par cette plante parent. Ainsi, les nouvelles herbes se développent et se transforment en nouvelles plantes dans la colonie. En cas de valeur maximale du nombre de plantes, une compétition entre elles sera lancée pour conserver les meilleures plantes [122]. L'expression générale de cette méthode bio-inspirée :

$$x_i^{k+1} = \sigma(t) * x_i^k + \sigma(k) * rand * (pbest_i^k - x_i^k) \quad (3.13)$$

où :

- x_i^{k+1} : position de la particule dans le champ à l'itération $k + 1$.
- x_i^k : position de la particule dans le champ à l'itération k .
- $\sigma(k)$: L'écart-type actuel.
- $pbest_i^k$: la meilleure position de la particule i jusqu'à l'itération k .
- $rand$: valeur aléatoire entre 0 et 1.

L'organigramme de la Figure 3.9 présente le principe général de l'algorithme IWO, avec ses principales étapes.

3.4.4 Discussion

Les algorithmes bio-inspirés ont suscité un intérêt croissant dans le domaine de l'optimisation, notamment pour résoudre des problèmes complexes, non linéaires et multi-objectifs. En informatique, elles sont largement utilisées pour l'optimisation du routage dans les réseaux sans fil mobiles, ainsi que dans la gestion des ressources en cloud computing, la sécurité des systèmes et l'Internet des Objets. En intelligence artificielle, elles permettent d'optimiser les hyperparamètres des modèles, d'améliorer l'apprentissage automatique et de créer des systèmes hybrides combinant évolution et apprentissage. En bio-informatique, elles servent à l'alignement de séquences génétiques, à la prédiction de structures moléculaires et à l'optimisation de traitements médicaux. Dans le génie industriel et la logistique, elles s'appliquent à la planification de production, à l'ordonnancement des tâches et à la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Elles sont aussi utilisées en robotique pour la navigation autonome et la coordination multi-robots, dans la gestion de l'énergie pour optimiser les

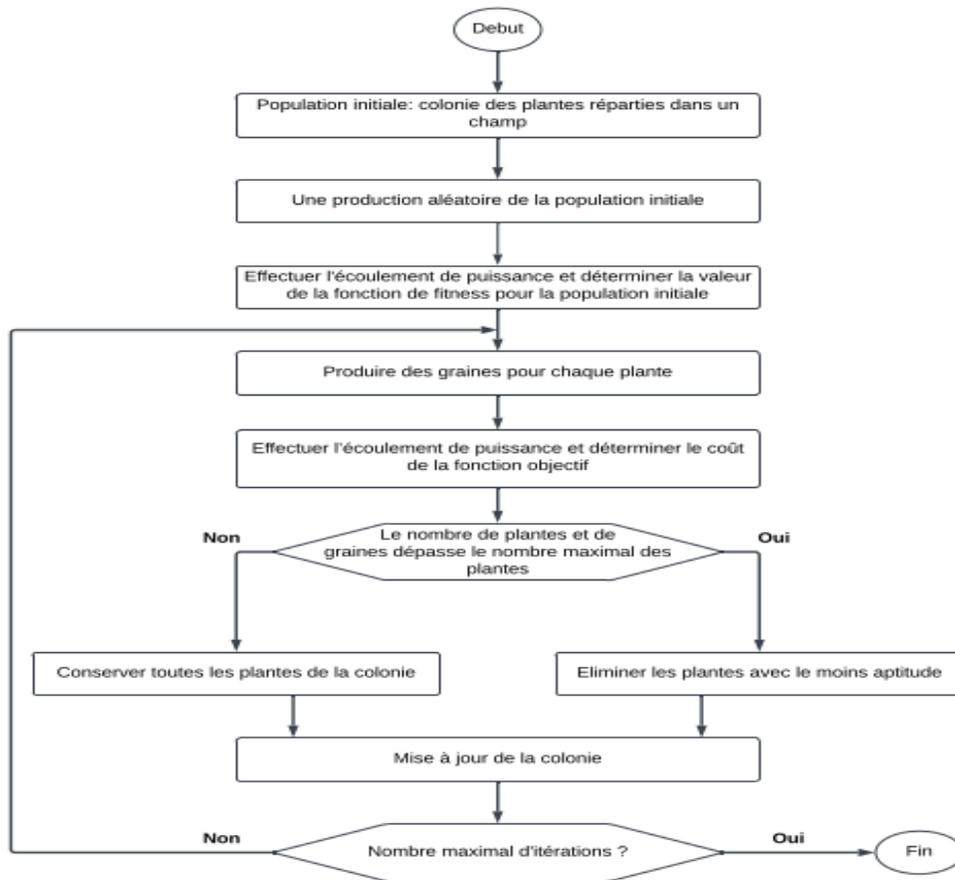


FIG. 3.9 – Organigramme de l’algorithme bio-inspiré IWO.

réseaux intelligents et modéliser des systèmes écologiques, ainsi qu'en finance pour la prévision des marchés et l'optimisation de portefeuilles. Ces domaines témoignent de la grande flexibilité et de la robustesse des approches bio-inspirées.

Chaque famille des méthodes bio-inspirées repose sur des mécanismes biologiques spécifiques comme la sélection naturelle pour les méthodes évolutionnaires, les interactions écosystémiques pour les méthodes écologiques, et les comportements collectifs d'organismes sociaux pour les méthodes distribuées. Malgré un objectif commun d'optimisation et d'adaptation, ces familles présentent des caractéristiques distinctes en termes de fonctionnement, d'applicabilité, de robustesse, et de complexité. La comparaison détaillée qui suit (voir Tableau 3.1) permet d'identifier les avantages, les limites et les domaines d'application privilégiés de chaque type de méthode bio-inspirée, afin d'orienter leur sélection selon le contexte et les contraintes du problème à résoudre [123] [124].

Caractéristiques	Méthodes évolutionnaires (EA)	Méthodes à base d'intelligence distribuée	Méthodes écologiques
Inspiration biologique	Basées sur les principes de la sélection naturelle et de l'évolution biologique.	Inspirées par les écosystèmes naturels où les organismes interagissent, coopèrent, ou se battent pour les ressources.	Basées sur les comportements collectifs des entités décentralisées comme les essaims d'animaux ou les colonies d'insectes.
Mécanisme de fonctionnement	Une population d'individus est générée et évolue au fil des générations via des opérateurs génétiques. Le but est de converger vers une solution optimale.	Les agents ou organismes interagissent entre eux de manière coopérative ou compétitive. L'algorithme favorise l'adaptation des agents à l'environnement.	Des agents autonomes interagissent avec leur environnement local et avec d'autres agents, prenant des décisions de manière distribuée sans contrôle centralisé, guidés par des règles simples et locales.

Caractéristiques	Méthodes évolutionnaires (EA)	Méthodes à base d'intelligence distribuée	Méthodes écologiques
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptabilité élevée aux environnements complexes et changeants • Capacité à trouver des solutions globales (ou proches de la solution optimale) même dans de grands espaces de recherche. • Large éventail d'applications dans des problèmes variés (ingénierie, optimisation, apprentissage automatique). 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploration diversifiée des solutions possibles grâce aux interactions entre agents. • Robustesse face aux perturbations environnementales ou aux défaillances de certains agents. • Simplicité d'implémentation pour des problèmes variés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Décentralisation complète, pas de besoin de gestion centralisée. • Réduction des coûts de communication dans les grands réseaux ou systèmes distribués. • Adaptation rapide aux changements de l'environnement grâce à des interactions locales simples.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Coût computationnel élevé • Risque de convergence prématurée vers une solution locale sans exploration suffisante. • Nécessite un bon réglage des paramètres (ex. taux de mutation et croisement). 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être moins efficace pour des problèmes nécessitant une exploration détaillée de l'espace de recherche. • La diversité des solutions peut parfois être trop grande, empêchant la convergence vers une solution optimale. • Peut nécessiter une modélisation complexe des interactions entre les agents. 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de stagnation si les agents restent coincés dans des solutions sous-optimales locales. • La cohésion entre les agents doit être bien gérée pour éviter des comportements inefficaces. • Peut être difficile de maintenir une bonne coordination entre les agents dans des systèmes très grands ou très dynamiques.

TAB. 3.1 – Analyse comparative entre les types de méthodes bio-inspirées.

3.5 Conclusion

Les méthodes bio-inspirées, aussi connues sous le nom de biomimétiques, s'appuient sur des stratégies, des structures et des processus observés dans la nature afin de résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Ces approches proposent une solution aux méthodes classiques en tirant parti de la diversité des mécanismes développés par la nature au fil des années d'évolution. Les chercheurs réussissent à étudier et à reproduire des solutions naturelles afin de créer des technologies plus performantes, durables et résistantes aux défis modernes.

Quelque soit le type de la méthode bio-inspirée (évolutionnaires, à base d'intelligence distribuée ou écologiques), elle offre la possibilité d'obtenir une solution optimale acceptable dans un délai raisonnable pour divers problèmes complexes, sans avoir besoin de connaissances approfondies du problème à résoudre. Cependant, pour certains problèmes ou certaines situations, il est impossible de garantir la qualité du résultat final obtenu. La performance d'une méthode méta-heuristique est exprimée en termes de qualité du résultat final et de robustesse.

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps étudié de manière globale une classification des méthodes bio-inspirées utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire complexes. Ensuite, nous avons exposé de manière plus approfondie quelques méthodes bio-inspirées les plus couramment utilisées en détaillant leurs sources d'inspiration, leurs différentes stratégies de conception et leur fonctionnement. Le prochain chapitre présente une analyse approfondie de quelques protocoles de routage dans les MANETs qui s'appuient sur des méthodes méta-heuristiques bio-inspirées.

Chapitre 4

Routage à base des méthodes bio-inspirées dans les réseaux MANETs

Contents

4.1	Introduction	73
4.2	Motivations pour l'utilisation des méthodes bio-inspirées lors du routage dans les réseaux MANETs	74
4.3	Concepts et opérations fondamentaux du routage bio-inspiré Dans les réseaux MANETs	75
4.4	Protocoles de routage à base des méthodes bio-inspirées dans les réseaux MANETs	78
4.4.1	Protocoles de routage basés sur les algorithmes évolutionnaires	78
4.4.2	Protocoles de routage basés sur l'intelligence distribuée	82
4.5	Discussion	89
4.6	Conclusion	93

4.1 Introduction

Il est difficile de gérer le routage dans les réseaux ad hoc en raison de l'absence d'infrastructure, de la forte mobilité des nœuds et de la diversité des environnements de communication. Une tâche complexe consiste à trouver un ou plusieurs chemins optimaux pour le routage des données dans de telles conditions, ce qui requiert des méthodes de calcul puissantes. Les chercheurs se sont inspirés de l'observation de la nature pour appliquer les principes observés dans les phénomènes naturels afin de concevoir des algorithmes performants pour résoudre certains problèmes complexes. Avec l'émergence des algorithmes inspirés de la nature (bio-inspirés), une nouvelle ère s'ouvre avec des méta-heuristiques qui imitent la nature afin de résoudre des problèmes d'optimisation. Ces algorithmes bio-inspirés utilisent des modèles provenant de phénomènes naturels afin de trouver des solutions appropriées dans des environnements dynamiques et incertains, tels que ceux des réseaux MANETs.

Dans le but d'optimiser les performances de routage dans les réseaux Ad hoc, des méthodes bio-inspirées de la nature ont été employées. Dans ces réseaux, les chercheurs ont découvert depuis quelques années une source d'inspiration inépuisable dans le monde naturel pour l'implémentation de nouveaux protocoles de routage.

4.2 Motivations pour l'utilisation des méthodes bio-inspirées lors du routage dans les réseaux MANETs

Les méthodes bio-inspirées ont été largement exploitées dans diverses disciplines informatiques, notamment dans les réseaux MANETs, pour traiter des problématiques telles que le routage, l'accès à Internet et la sécurité. L'intérêt majeur de ces approches réside dans la similitude frappante entre les mécanismes de communication en réseau et les interactions naturelles observées au sein d'une même espèce. Cette section explore ainsi les principales motivations qui font des solutions bio-inspirées une approche particulièrement pertinente pour l'optimisation du routage dans les réseaux MANETs [125].

L'évolutivité des réseaux

L'évolutivité d'un réseau, définie comme sa capacité à gérer efficacement un grand nombre de nœuds, constitue un défi majeur dans la recherche sur le routage des réseaux MANETs, en raison de la dégradation des performances de transmission lorsque cette contrainte n'est pas correctement prise en charge. Les protocoles de routage traditionnels offrent généralement une bonne évolutivité dans les scénarios de faible densité, comme en milieu rural, où le réseau est constitué d'un nombre restreint de nœuds. Cependant, leur efficacité diminue considérablement à grande échelle. En revanche, les protocoles bio-inspirés se révèlent plus adaptés aux réseaux MANETs denses, car ils s'appuient sur des modèles naturels d'auto-organisation. Par exemple, les colonies de fourmis établissent de longs trajets vers une source de nourriture en collaborant à grande échelle, tandis que les abeilles trouvent efficacement leur chemin entre la ruche et la nourriture grâce au partage d'informations sur la localisation, la direction, la quantité et la qualité des ressources disponibles. Ces principes inspirés de la nature permettent ainsi d'améliorer la robustesse et l'évolutivité du routage dans les réseaux MANETs.

Ainsi, dans les réseaux MANETs à grande échelle, les concepteurs de protocoles de routage se sont inspirés des phénomènes biologiques pour développer de nouvelles approches permettant de découvrir et de maintenir des chemins optimaux entre un nœud source et un nœud de destination. Ces solutions s'appuient sur une coopération locale et une communication progressive entre les nœuds voisins, reproduisant ainsi les interactions observées dans le monde naturel. À l'image des espèces vivantes qui collaborent pour atteindre un objectif commun, les nœuds du réseau interagissent et échangent des informations jusqu'à l'établissement d'un chemin optimal vers la destination.

La complexité de calcul

Dans les réseaux MANETs, la diffusion des paquets de données peut engendrer une complexité de calcul élevée, due au grand nombre d'opérations nécessaires pour établir un chemin valide entre un nœud source et sa destination. Cette complexité constitue une motivation majeure pour l'adoption d'approches bio-inspirées, qui permettent de résoudre ces défis tout en maintenant une faible complexité computationnelle. En effet, dans ces réseaux dynamiques, les coûts de calcul tels que le temps d'exécution et l'utilisation de structures de données volumineuses (comme les tables de routage et la mémoire) peuvent impacter la qualité des chemins générés par les protocoles de routage

traditionnels. Ces derniers mettent souvent plus de temps à s'adapter aux changements de topologie causés par la mobilité des nœuds, ce qui entraîne des redécouvertes fréquentes des chemins et une surcharge du réseau en raison de la génération excessive de paquets de contrôle.

Cependant, les approches bio-inspirées ont démontré leur efficacité en permettant la découverte des chemins optimaux tout en réduisant la complexité computationnelle. Ces approches offrent notamment des temps de découverte plus courts et nécessitent des structures de routage plus légères, comme des tables de routage réduites, optimisant ainsi la gestion des ressources réseau.

L'auto-organisation et l'adaptabilité

Le routage auto-organisé repose sur une approche distribuée où chaque nœud du réseau MANET participe de manière autonome à la découverte et à la gestion des chemins, sans intervention humaine directe. Contrairement aux protocoles classiques, qui nécessitent souvent une reconfiguration manuelle en cas de changements de topologie, les solutions basées sur des politiques auto-organisées s'adaptent dynamiquement aux variations du réseau induites par la mobilité des nœuds. Dans ce contexte, les méthodes bio-inspirées apparaissent comme une alternative efficace, permettant de concevoir des protocoles coopératifs qui s'appuient sur des interactions locales entre nœuds, à l'image des colonies d'insectes qui accomplissent collectivement des tâches complexes, telles que la recherche de nourriture ou la construction d'un nid.

La robustesse du routage

La robustesse du routage repose sur la capacité d'un protocole à maintenir des communications fiables entre la source et la destination, malgré les pannes de liaison, la suppression de nœuds ou d'éventuelles attaques ciblées. Dans un environnement dynamique comme les réseaux MANETs, cette robustesse est essentielle pour garantir une transmission continue des paquets face aux perturbations du réseau. Les protocoles bio-inspirés offrent une solution efficace en s'appuyant sur des mécanismes de réaction collaborative entre les nœuds, similaires aux comportements observés dans les systèmes naturels, où les organismes s'adaptent collectivement aux changements et aux menaces externes pour assurer la stabilité globale du système.

Comme exemple, le système immunitaire humain constitue un exemple pertinent de mécanisme de défense distribué, capable d'identifier et de neutraliser les menaces tout en s'adaptant aux nouvelles attaques. Cette analogie a été exploitée dans les réseaux MANETs, où des protocoles inspirés du comportement immunitaire ont été développés pour assurer un routage sécurisé. Par exemple, l'étude menée par [126] a démontré que ces approches bio-inspirées surpassent les solutions non bio-inspirées, en offrant une meilleure résilience aux attaques, une capacité d'adaptation accrue et une détection plus efficace des anomalies réseau. Ce succès illustre le potentiel considérable des techniques bio-inspirées pour le routage dans les réseaux dynamiques, notamment en termes de sécurité et d'efficacité par rapport aux méthodes traditionnelles.

4.3 Concepts et opérations fondamentaux du routage bio-inspiré Dans les réseaux MANETs

Les concepts fondamentaux et les principales opérations des protocoles bio-inspirés sont introduits de manière concise afin de faciliter leur compréhension. Le routage dans les réseaux MANETs est utilisé comme cas d'étude pour illustrer ces principes. À cette fin, la Figure 4.1 présente un exemple d'un réseau MANET, permettant d'illustrer le fonctionnement des approches bio-inspirées appliquées au routage dans ces réseaux dynamiques.

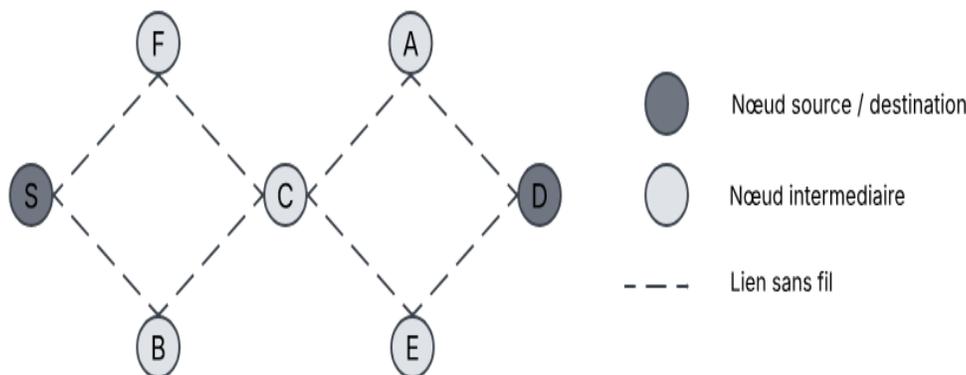


FIG. 4.1 – Exemple illustratif d'un réseau MANET.

Définition du problème d'optimisation

Le routage dans les réseaux MANETs peut être formulé comme un problème d'optimisation, où il s'agit de sélectionner le chemin le plus efficace parmi plusieurs options reliant une même source à une même destination. Ce type de problème relève des problèmes de décision, où une solution optimale doit être identifiée en fonction de critères spécifiques [127]. En l'absence d'un algorithme polynomial, ces problèmes sont généralement classés comme NP-Difficiles, ce qui signifie qu'aucune solution optimale ne peut être trouvée en temps polynomial de manière déterministe.

Espace de recherche

L'espace de recherche (SSp) désigne l'ensemble des solutions possibles pour un problème d'optimisation, qui peut être continu ou discontinu. Il est souvent représenté sous forme de graphe (voir Figure 4.2), où chaque solution est évaluée en fonction de sa pertinence par rapport au problème étudié. Dans cet espace, on distingue l'optimum global, qui correspond à la meilleure solution possible, et les optima locaux, qui représentent les meilleures solutions dans des régions spécifiques du graphe. Toutefois, en raison de la complexité des problèmes d'optimisation, l'espace de recherche est généralement très vaste, rendant la recherche d'une solution optimale particulièrement difficile.

Dans les réseaux MANET, l'espace de recherche d'un problème de routage correspond à l'ensemble de tous les chemins possibles reliant un nœud source à un nœud de destination. Cet espace peut être très vaste, en raison de la dynamique du réseau et de la mobilité des véhicules. Par exemple, dans un scénario donné, plusieurs chemins peuvent exister entre une source et une destination, chacun ayant des caractéristiques distinctes en termes de distance, de stabilité des liens, de congestion du réseau ou de consommation d'énergie. L'objectif des algorithmes de routage bio-inspirés est d'explorer efficacement cet espace pour identifier le chemin optimal, garantissant une transmission fiable et performante des paquets de données.

La fonction de fitness

Dans les réseaux MANET, une fonction de fitness (ou fonction objective) est utilisée pour évaluer et classer les solutions de routage au sein de l'espace de recherche. Cette fonction attribue une valeur quantitative à chaque chemin potentiel en fonction de critères prédéfinis tels que la latence, la consommation d'énergie, la stabilité des liens ou la congestion du réseau.

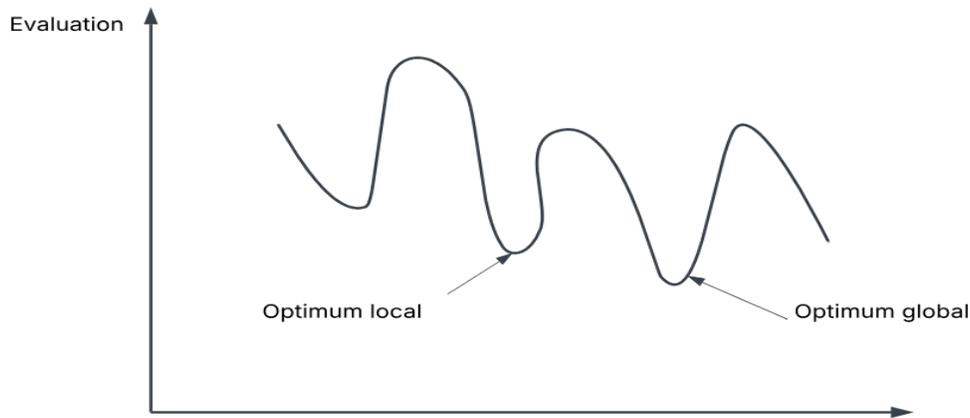


FIG. 4.2 – Espace de recherche dans un problème d’optimisation.

La population

Dans le contexte des réseaux MANETs, une population représente un ensemble de solutions candidates (ou individus) sélectionnées au sein de l’espace de recherche pour résoudre le problème de routage. Chaque individu de la population correspond à un chemin potentiel entre un nœud source et un nœud destination. La taille de la population détermine le nombre de chemins considérés à chaque itération de l’algorithme.

Le codage individuel

Le codage des individus est une étape essentielle dans la représentation des solutions du problème de routage dans les réseaux MANETs. Chaque chemin candidat entre un nœud source (S) et un nœud destination (D) peut être représenté sous différentes formes selon le type de codage choisi :

1. **Le codage binaire** : Chaque chemin est représenté par une séquence de bits (0 et 1), où chaque position indique la présence ou l’absence d’un nœud donné.
2. **Le codage discret** : Utilisation d’un vecteur discret où chaque valeur représente un nœud intermédiaire dans le chemin.
3. **Le codage naturel** : Chaque individu est décrit par une suite ordonnée de nœuds (valeurs entières) reliant la source à la destination.

Le choix du type de codage influe directement sur l’efficacité de l’algorithme d’optimisation, notamment en réduisant la complexité de calcul et en facilitant les opérations d’exploration et d’exploitation de l’espace de recherche [127].

L’initialisation

L’initialisation est une étape cruciale dans le processus d’optimisation, car elle détermine la population de départ à partir de laquelle l’algorithme évoluera. Cette première population est un ensemble de solutions candidates extraites de l’espace de recherche (SSp). Deux principales méthodes permettent de générer cette population initiale. La première approche, dite aléatoire, consiste à sélectionner les individus de manière aléatoire dans le SSp, garantissant ainsi une diversité élevée et favorisant une exploration efficace de l’espace de recherche. Elle assure également une répartition uniforme, où chaque solution a une probabilité égale d’être choisie. La seconde approche, appelée heuristique ou guidée, utilise des règles spécifiques pour favoriser des solutions prometteuses dès

l'initialisation. Cette méthode peut s'appuyer sur des heuristiques ou des expériences antérieures pour orienter la recherche vers des solutions plus optimales dès le départ. Cependant, dans les algorithmes bio-inspirés, l'approche aléatoire est souvent privilégiée afin d'éviter un biais initial et de maximiser l'exploration du SSp.

Le critère d'arrêt

Le critère d'arrêt joue un rôle fondamental dans le contrôle du temps d'exécution d'un algorithme d'optimisation en déterminant à quel moment le processus doit s'interrompre. Il peut être défini de manière statique ou dynamique. Un critère d'arrêt statique repose sur un nombre fixe d'itérations prédéfini avant le lancement de l'algorithme, garantissant ainsi un temps d'exécution limité mais ne tenant pas compte de l'évolution de la recherche. À l'inverse, un critère d'arrêt dynamique permet une terminaison adaptative en fonction de l'amélioration de la fonction de fitness. Dans ce cas, l'algorithme continue à s'exécuter jusqu'à ce que l'optimisation atteigne un état de convergence, c'est-à-dire lorsqu'aucune amélioration significative de la solution n'est observée après un certain nombre d'itérations. Toutefois, pour éviter une exécution infinie en l'absence de convergence, un seuil maximal d'itérations est généralement imposé, permettant ainsi de gérer les situations où l'algorithme ne parvient pas à se stabiliser dans un laps de temps raisonnable.

4.4 Protocoles de routage à base des méthodes bio-inspirées dans les réseaux MANETs

Il a été démontré que la gestion du routage dans les réseaux ad hoc est un défi NP-complexe avec plusieurs objectifs contradictoires [128]. Ainsi, le délai nécessaire pour trouver une solution optimale avec une méthode exacte est exponentiel et parfois inapplicable. C'est pourquoi cette difficulté peut être réduite à un problème d'optimisation à résoudre en utilisant des méthodes bio-inspirées. Différentes méthodes bio-inspirées travaillent en tant que systèmes extrêmement décentralisés composés de divers éléments. Il est possible de les utiliser pour résoudre différents problèmes liés à la conception et au fonctionnement des MANETs.

Dans cette section, et selon la classification des algorithmes bio-inspirés, nous détaillerons des contributions les plus récentes utilisées lors du routage dans les réseaux ad hoc. Ensuite, sur la base de ces travaux, nous présentons une comparaison des méta-heuristiques de routage dans ce type de réseaux.

4.4.1 Protocoles de routage basés sur les algorithmes évolutionnaires

4.4.1.1 Protocoles de routage basés sur l'algorithme d'évolution différentielle

Au cours de la dernière décennie, les algorithmes d'évolution différentielle (DE) ont été largement utilisés dans divers domaines tels que le routage dans les réseaux sans fil, et ont réussi efficacement à trouver les solutions optimales.

1. Dans [129], les auteurs ont mis l'accent sur un protocole de routage multi-chemins à vecteur de distance pour les réseaux ad hoc nommé DE_AOMDV. La sélection du chemin optimal s'effectue grâce à la fonction de fitness qui repose sur l'exigence d'un nombre minimal de sauts et le temps de transmission le plus faible. Ce protocole se base sur un algorithme d'évolution différentielle DE. Cet algorithme figure parmi les techniques d'optimisation évolutionnaires stochastiques basées sur les populations les plus récentes. L'ED est une approche heuristique visant à réduire les

fonctions continues spatiales non linéaires et non différentiables. Il aide à résoudre le problème d'optimisation du routage en considérant les solutions d'égalité linéaire aux problèmes d'optimisation en utilisant trois opérations de base : la mutation, le croisement et la sélection. L'ED se compose de plusieurs phases, comme l'initialisation de la population, la fonction de fitness, la mutation, le croisement et le modèle de sélection. L'algorithme DE est mis en œuvre sur les chemins à nœuds disjoints dérivés de l'étape de découverte des chemins.

En cas de défaillance d'une liaison du chemin principal, le protocole de routage DE_AOMDV construit des chemins de secours de la source à la destination à l'aide de l'algorithme DE. Le chemin optimal d'un nœud source vers un nœud destination est obtenu en utilisant l'algorithme DE, un chemin alternatif est trouvé et prêt à être utilisé en cas de défaillance de la liaison. Le chemin alternatif sera le meilleur chemin suivant par rapport au chemin optimal. Lorsqu'un chemin principal échoue, le protocole peut récupérer la connexion en utilisant les chemins de secours à l'aide de cette méthode. Ce routage de chemin de secours contient deux fonctions principales : la phase de découverte des chemins et la phase de maintenance des chemins.

Le protocole de routage DE_AOMDV suggéré offre de meilleures performances qui ont amélioré la qualité du routage dans les MANETs. DE_AOMDV a fourni des chemins de secours pour éviter la découverte en cas de défaillance des liaisons entre les nœuds du réseau. L'évaluation de cette solution a considéré une variété de modèles de mobilité réalistes, intégrant des scénarios particuliers tels que la densité élevée et la forte mobilité des nœuds. DE_AOMDV a montré des bons résultats par rapport au protocole de base AOMDV en termes de délai de bout en bout, de taux de livraison de paquets et de débit.

2. Dans [130], les auteurs ont appliqué l'algorithme d'évolution différentielle pour la résolution des problèmes de chemin optimal pour la transmission des données d'une source vers une destination dans les réseaux mobiles ad hoc. Le modèle d'optimisation basé sur l'évolution différentielle permet d'analyser et d'établir le meilleur chemin optimal disponible dans le réseau. Ce modèle prend en compte le coût de transmission afin de rechercher le chemin à consommation minimale. L'algorithme d'évolution différentielle est utilisé comme outil de recherche pour rechercher la consommation minimale de transmission grâce à un modèle d'optimisation établi. La qualité de la solution obtenue par DEO dans l'ensembles de tests est supérieure à celle de PSO et de GA, en plus DEO converge plus rapidement que les deux autres algorithmes.
3. Dans [131], les auteurs ont proposé un nouvel algorithme de clustering basé sur la méthode évolution différentielle pour les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) nommé DECA. L'objectif de cette solution est de prolonger la durée de vie du réseau en prenant en compte la consommation énergétique des nœuds capteurs communs et des passerelles (c.-à-d. les têtes de cluster (CHs)). Grâce à la durée de vie du réseau, le temps écoulé est entendu entre le déploiement du WSN et la mort du premier CH. Cette mort est retardée grâce à l'équilibrage de la consommation énergétique des CHs, implémenté par le taux de consommation énergétique et l'énergie résiduelle. Une phase d'amélioration locale a été intégré dans l'ED traditionnelle pour une convergence plus rapide et pour obtenir des meilleures performances de l'algorithme proposé. Les résultats expérimentaux démontrent l'efficacité de l'algorithme proposé en termes de durée de vie du réseau, de consommation énergétique et de taux de convergence par rapport aux algorithmes GA, DE, EELBCA, LBC et GLBCA. Cependant, les têtes de cluster ne sont pas uniformément répartis, ce qui peut entraîner une consommation énergétique déséquilibrée dans les RCSFs.

4.4.1.2 Protocoles de routage basés sur l'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques (AG) offrent une approche bio-inspirée pour résoudre le problème du routage dans les réseaux MANETs en optimisant les chemins de communication. Ils reposent sur les principes de la sélection naturelle et de l'évolution pour trouver des solutions proches de

l'optimum en explorant un grand espace de recherche. Dans le contexte du routage des réseaux MANETs, un AG peut être utilisé pour sélectionner des chemins optimaux en tenant compte de plusieurs contraintes, tels que la stabilité des liens, la consommation énergétique et la congestion du réseau.

1. Afin de répondre aux problèmes de collision de données et la consommation d'énergie des nœuds qui affectent la capacité d'un réseau ad hoc à transférer des données et à fonctionner efficacement, les auteurs ont proposé dans [132] un protocole de routage intitulé AOMDV avec FFn (AOMDV-FFn) et un protocole de routage adaptatif basé sur un algorithme génétique bio-inspiré pour les réseaux MANETs ; c'est une combinaison du protocole de routage réactif AOMDV avec un algorithme génétique (c'est-à-dire AOMDV-GA). Ces deux protocoles utilisent le même principe de découverte des chemins que celui de AOMDV, ainsi ils sélectionnent le chemin le plus optimal et le plus fiable d'une source à une destination en se basant sur une fonction de fitness constituée de trois contraintes à savoir : l'énergie résiduelle, la distance et la congestion des liens. L'Algorithme 8 est utilisé pour calculer la fonction fitness pour le nombre total k de chemins de la source à la destination.

```

1  début
2  |   pour ( $i = 1; i \leq k; i++$ ) faire
3  |   |    $F_e(i) = \frac{E_{en}}{E_{an}}$ 
4  |   |    $F_d(i) = \frac{D_{n,n}}{D_{sd}}$ 
5  |   |   si ( $L \leq N$ ) alors
6  |   |   |    $F_c(i) = 1 - \frac{L}{B}$ 
7  |   |   sinon
8  |   |   |    $F_c(i) = 0$ 
9  |   |   fin
10 |   |    $F = F_e(i) + F_d(i) + F_c(i)$ 
11 |   |   retourner  $F$ 
12 |   fin
13 fin
    
```

Algorithme 8 : Calcul de la Fonction de Fitness.

Le protocole AOMDV-GA utilise l'algorithme génétique pour sélectionner des nouveaux chemins en se basant sur la fonction de fitness pour le transfert des paquets de données. GA utilise le processus en cinq étapes (initialisation, calcul de la fonction de fitness, sélection, croisement, mutation et sélection des survivants). Le processus de l'algorithme suggéré AOMDV-GA est présenté dans la Figure 4.3.

Suite aux expériences de simulation qui ont été menées, les deux protocoles de routage implémentés surpassent les protocoles de routage réactifs AODV et AOMDV et le protocole FF-AOMDV. De manière distincte, AOMDV-GA est légèrement plus performant que AOMDV-FFn dans diverses mesures de performances du réseau. Cela montre l'efficacité des méthodes bio-inspirées lors de leur implémentation pour résoudre le problème du routage dans les réseaux MANETs.

2. Dans [133], les auteurs ont implémenté un protocole de routage à vecteur de distance multi-chemins à la demande (GA-AOMDV) basé sur un algorithme génétique (GA), conçu pour les réseaux de capteurs. Pour les chemins sélectionnés par le protocole de routage AOMDV, une nouvelle fonction de fitness est calculée qui optimise ces chemins en fonction de la consommation énergétique de leurs nœuds. Autrement dit, AOMDV renvoie plusieurs chemins avec le nombre minimal de sauts. Ensuite, FF est appliqué aux chemins AOMDV afin d'optimiser le chemin passant par les nœuds présentant la plus grande énergie résiduelle. GA-AOMDV surpasse les autres protocoles en termes de taux de livraison des paquets, de débit, de temps d'aller-retour et de consommation énergétique. De plus, GA-AOMDV ne nécessite pas de ressources de traitement

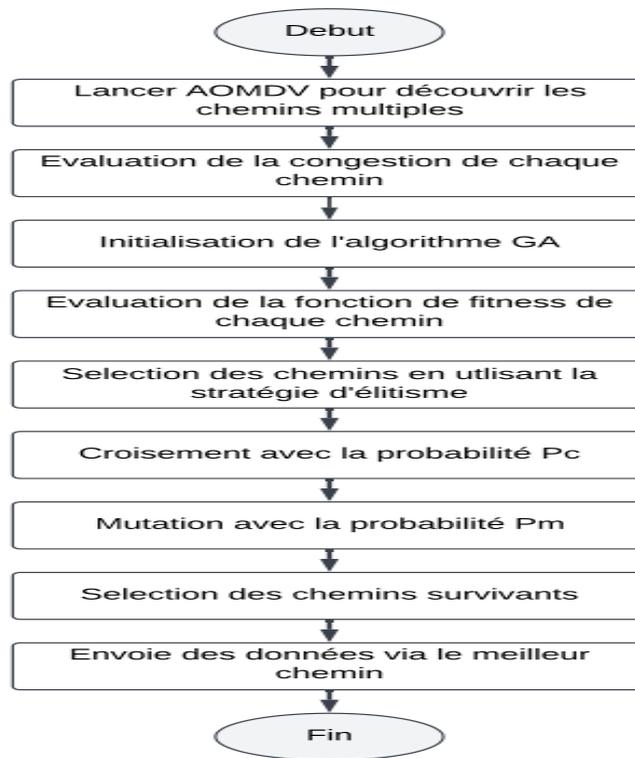


FIG. 4.3 – Organigramme du protocole AOMDV-GA.

importantes, contrairement à d'autres protocoles. Cependant, l'implication d'une seule contrainte lors du choix des meilleurs chemins pour le transfert des données n'est pas idéale.

3. Dans [134], les auteurs ont proposé un protocole de routage basé sur un algorithme génétique nommé GAR (Genetic-algorithm-based routing) pour les réseaux FANETs. Cette solution est combinée aux fonctionnalités de recherche à la demande du protocole de routage de classe basé sur la topologie. Le protocole GAR repose sur un algorithme génétique amélioré pour la recherche de chemins et prend en compte plusieurs contraintes tels que la stabilité et la bande passante du lien, l'énergie du nœud. GAR améliore les opérateurs de sélection, de croisement et de variation de l'algorithme génétique, permettant ainsi de planifier rapidement et à moindre coût un chemin optimisé entre le nœud source de la communication et le nœud de destination. Les résultats expérimentaux montrent que GAR améliore considérablement le débit, réduit les délais et améliore la stabilité du réseau, ce qui est plus adapté aux réseaux FANETs. Néanmoins, les simulations ont été réalisées dans un environnement à deux dimensions et les résultats obtenus ont été mis en comparaison avec d'autres protocoles de base à savoir AODV et DSR.
4. Dans [135], les auteurs soulignent que les avancées récentes dans le domaine de l'Internet des objets (IoT) ont considérablement facilité la recherche sur les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux maillés sans fil. Un routage efficace des données dans ces réseaux repose sur la résolution d'un problème d'optimisation intégrant de multiples contraintes, telles que la sélection du chemin, la consommation énergétique des nœuds, la qualité des liaisons et la gestion du trafic. Une optimisation efficace permettrait de réduire significativement la consommation d'énergie. L'algorithme génétique (AG) est une approche heuristique capable de répondre à ces problématiques à l'échelle du réseau. Cependant, sa convergence prématurée peut limiter son efficacité en restreignant l'exploration de l'espace de recherche et en empêchant la découverte des solutions énergétiquement optimales. Pour pallier ces limites, un algorithme génétique amélioré intégrant

une technique de recherche locale peut être mis en œuvre. Dans cette étude, les auteurs ont proposé un algorithme modifié, appelé algorithme génétique amélioré maximal (MEGA), qui combine des stratégies de recherche locale et des mécanismes de veille-réveil pour optimiser dynamiquement un réseau de capteurs sans fil (WSN). En tenant compte des contraintes de communication et de la consommation énergétique des capteurs lors de leur fonctionnement et de leurs échanges, MEGA vise à améliorer l'efficacité du routage. L'évaluation des performances du protocole MEGA a été réalisée en le comparant à plusieurs protocoles existants. À cette fin, les protocoles WSNs ont été développés et testés à l'aide d'outils de simulation, permettant d'analyser leur comportement dans divers scénarios et conditions réseau. Dans l'ensemble, le protocole de routage MEGA contribue à réduire la consommation énergétique. En particulier, le mécanisme de veille/réveil permet d'optimiser les économies d'énergie en désactivant temporairement certains nœuds. Cependant, l'exécution alternée des mécanismes de recherche locale et de veille/réveil introduit une certaine complexité. De plus, la recherche du chemin optimal et l'identification des nœuds actifs entraînent une consommation énergétique supplémentaire.

4.4.2 Protocoles de routage basés sur l'intelligence distribuée

4.4.2.1 Protocoles de routage basés sur l'algorithme des colonies de fourmis

1. Afin d'améliorer la fiabilité des chemins découverts par les protocoles de routage conçus, qui est l'un des paramètres clés pour un transfert réussi des messages multimédias et d'urgence dans les réseaux MANETs décentralisés et hautement dynamiques, les auteurs ont suggéré dans [136] une solution de routage inter-couches à énergie consciente basée sur l'optimisation des colonies de fourmis nommée AOERP. Comme la majorité des protocoles de routage ACO méta-heuristiques dans les MANET sont élaborés sur le fondement d'une stratégie monocouche classique, qui peut répondre à deux ou trois indicateurs de qualité de service (QoS). Le protocole AOERP a pris en compte le paradigme inter-couches en plus de l'algorithme ACO pour utiliser les trois couches inférieures telles que les couches physique, MAC et réseau, afin de prendre en charge toutes les exigences de qualité de service. Le protocole AOERP se base sur le protocole de base AODV. La Sélection de nœud relais adaptatif (ARN) se fait essentiellement selon le facteur d'énergie et le rapport de nœuds voisins (NNR) à chaque nœud mobile en direction de la destination. Les nœuds qui présentent un facteur d'énergie maximal et un NNR minimal sont sélectionnés pour servir de nœuds relais adaptatifs. Le protocole de routage AOERP prend en compte un plus grand nombre de facteurs critiques comme le délai, le facteur de stabilité, l'engorgement et le nombre de sauts afin de choisir le chemin optimal. Les données concernant ces mesures sont actualisées à chaque occasion dans la table de routage du nœud relais adaptatif. La valeur de phéromone est déterminée pour tous les nœuds relais identifiés en se basant sur les ARN détectés grâce au rapport des nœuds adjacents. La phase de maintenance du chemin est effectuée en déterminant les mesures de performance liées au temps de retard et au facteur de stabilité. Comme indiqué, en vue de la conservation du chemin, le délai de retard est conservé à demi de la portée radio grâce à un coefficient de stabilité unitaire pour pouvoir répondre promptement aux interruptions de connexion et mettre en place des connexions alternatives. Les performances du protocole AOERP ont été évaluées en les comparant aux schémas de routage EPAAODV et K-means-AODV-ACO, pour différentes densités et vitesses de nœuds. Les résultats de l'expérimentation indiquent que l'AOERP suggéré surpasse les autres protocoles en termes de divers indicateurs de performance tels que le temps d'exécution total, l'efficacité énergétique, la fiabilité et le taux de nœuds inopérants.
2. Les avancées récentes en microélectronique ont favorisé l'intégration des réseaux de capteurs sans fil (WSNs) dans les systèmes de surveillance intelligents (IMSS). Dans ces applications, le trafic

de données lié aux événements requiert une transmission rapide et fiable afin de permettre une réaction immédiate et la prise de décisions adaptées. Toutefois, la contrainte énergétique des nœuds capteurs impose un équilibre entre le délai de transmission et la consommation d'énergie lors du choix du chemin vers la station de base. Pour répondre au défi du routage multi-contraintes induit par ce type de trafic, les auteurs ont proposé dans [137] un protocole de routage multi-objectifs, nommé MACO-QCR, a été développé pour assurer la communication inter-cluster dans les IMS basés sur des WSN. Ce protocole repose sur une version améliorée de l'optimisation par colonies de fourmis (ACO), qui intègre deux objectifs d'optimisation : la minimisation de la consommation d'énergie et la réduction du délai de bout en bout. La sélection du chemin de routage s'appuie sur des informations multi-phéromones et des heuristiques multiples définies en fonction de ces deux critères. Afin d'identifier des solutions optimales selon le concept de Pareto, MACO-QCR utilise une technique d'archivage externe combinée à une fonction d'appartenance floue pour attribuer des valeurs de fitness aux solutions non dominées. De plus, ce protocole adopte une approche inter-couches, favorisant l'interaction entre les couches de routage et d'accès au support (MAC) pour optimiser la sélection des nœuds relais. Les résultats de simulation démontrent que MACO-QCR améliore l'efficacité énergétique, tout en réduisant le délai de bout en bout par rapport aux protocoles IAMQER et O_ARA, selon la proportion de nœuds impliqués dans le trafic d'événements au sein du réseau. Cependant, l'algorithme a négligé l'optimisation de la population initiale, ce qui conduit le schéma de routage à un optimum local.

3. Dans [138], les auteurs ont suggéré une nouvelle technique d'optimisation hybride inspirée de la nature, basée sur l'algorithme ACO et l'algorithme PSO, appelée AOMDV-ACOPSO, afin d'améliorer les performances du routage dans les réseaux MANETs. Le protocole AOMDV permet de trouver les multiples chemins de transfert de données du nœud source vers le nœud destination, tandis que la technique hybride ACO-PSO permet de sélectionner le chemin optimal parmi les multiples chemins générés par le protocole AOMDV. L'approche proposée repose sur le calcul initial de la fonction de fitness sur une population de départ, suivi d'une évaluation itérative de la fitness pour de nouvelles populations, obtenues par des opérations successives sur les précédentes. À terme, toutes les solutions sont comparées à la solution optimale afin d'identifier la meilleure. Cette dernière fournit les valeurs optimales de la population, permettant ainsi de déterminer le chemin de routage le plus efficace. L'algorithme proposé combine les forces du PSO et de l'ACO : les résultats de l'ACO servent d'entrée à l'algorithme PSO, qui vient affiner et améliorer les performances du processus de routage. L'optimisation par colonies de fourmis est ainsi améliorée pour identifier le chemin le plus court. Cette approche ne se limite pas à réduire le nombre de chemins explorés par l'ACO, mais permet également d'identifier le plus optimal parmi les chemins les plus longs. Les performances de l'approche proposée sont analysées et comparées aux approches existantes en termes de taux de livraison des paquets (PDR), de consommation d'énergie (EC), de délai de bout en bout (E2E) et de débit. Les résultats de simulation révèlent que l'approche proposée est meilleure que les autres à savoir : AODV, AOMDV, ACO-AOMDV et PSO-AOMDV. Cependant, les contraintes de stabilité ou de qualité des liens n'ont pas été prise en considération lors du calcul de la fonction de fitness.

4.4.2.2 Protocoles de routage basés sur l'algorithme d'optimisation par essais particuliers

1. Dans les réseaux MANETs, plusieurs méthodes ont été mises en œuvre pour optimiser l'efficacité énergétique et résoudre le problème majeur des défaillances des liaisons sans fil. Dans [139], les auteurs ont suggéré un protocole de routage multi-chemins économe en énergie PESR (Proficient Energy Saving Routing) dans le but d'obtenir un routage efficace en énergie immuable avec une connaissance de la conscience énergétique. Le mécanisme de découverte de voisin enrichi (END)

et la méthode bio-inspirée d'optimisation par essaim de particules (PSO) sont utilisés dans cette solution de routage. Dans l'approche PESR suggérée, l'architecture MANET est d'abord mise en place. Par la suite, lors de la découverte des voisins, les nœuds avoisinants sont repérés et constituent avec ces nœuds identifiés une table de voisinage. À l'aide de cette table de voisinage, un paquet de type RREQ est diffusé aux nœuds adjacents afin de sélectionner un nœud. Par la suite, un message de confirmation (ACK) est reçu de la table des voisins. Par la suite, on détermine la distance du nœud adjacent en utilisant des critères basés sur la distance. Si l'ACK est reçu, il éliminera les paquets de données présents dans la file d'attente et enverra le paquet suivant. Autrement, il modifie le nœud suivant pour la transmission. Dans le cas où la condition préalable est remplie, le protocole procède à l'évaluation des paramètres multi-attributs des nœuds adjacents. En évaluant ces paramètres de nœud, le chemin de transmission des données est découvert. Par la suite, ces paramètres évalués sont rafraîchis dans la table de routage de liaison afin de sélectionner le meilleur chemin parmi les nœuds voisins. Le routage optimisé peut être obtenu grâce à la méthode PSO. Après cela, le chemin de liaison examine également les éventuelles défaillances dans la connexion. En cas de dysfonctionnement de la liaison, le processus d'évaluation des paramètres du nœud est réitéré jusqu'à ce qu'aucune condition de rupture de lien ne soit constatée. Dès que le chemin est exempt de toute défaillance de liaison, la transmission des données peut alors s'effectuer. La description suivante présente la démarche globale de l'algorithme de cadre PESR proposé (voir Figure 4.4).

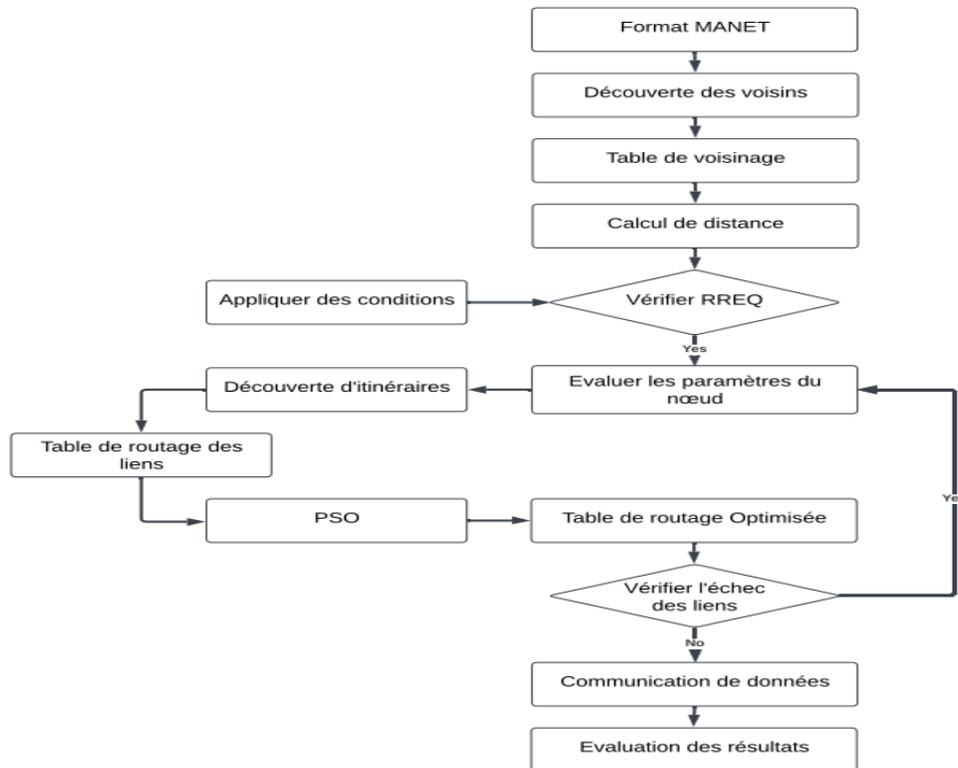


FIG. 4.4 – Principe de fonctionnement du protocole PESR.

D'après les résultats, le protocole PESR a atteint la durée de vie maximale du réseau, un débit accru et un délai de bout en bout avec une consommation d'énergie moindre, ce qui réduit le taux de perte de paquets et la surcharge. Ainsi, le protocole PESR conçu enrichit ses capacités et surpasse les autres protocoles TIGHT et PS-ROGR en termes de consommation d'énergie, de

durée de vie du réseau et de débit.

2. L'optimisation du routage dans les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) à ressources énergétiques limitées représente un défi majeur en recherche. Dans [140], une nouvelle approche basée sur l'optimisation par colonies de fourmis (ACO) est proposée afin de déterminer le chemin optimal de transmission des données dans les réseaux WSNs, tout en améliorant l'efficacité énergétique et les performances globales du réseau. La sélection du chemin prend en compte plusieurs paramètres essentiels, notamment la polyvalence des nœuds, leur énergie résiduelle, leur capacité limitée et la longueur du trajet. Ces critères sont intégrés au processus décisionnel afin d'optimiser la correspondance entre les nœuds et d'assurer une transmission efficace des données. De plus, les principes d'organisation des insectes souterrains ont été exploités pour affiner cette approche. En intégrant la mobilité et la gestion énergétique des nœuds, l'algorithme proposé permet d'identifier un chemin optimal garantissant un coût minimal entre le nœud source et le nœud destination. Sa performance a été évaluée par rapport à l'algorithme ACO classique. Cette nouvelle méthode offre non seulement une convergence plus rapide vers le meilleur chemin, mais aussi une optimisation de la consommation énergétique des nœuds lors de la transmission des données. Cependant, le calcul de la fonction de fitness ne prend pas en compte les contraintes de stabilité et de qualité des liens. Ainsi, l'environnement à grande échelle n'a pas été considéré et les paramètres utilisés lors de la simulation ont été déterminés expérimentalement.
3. Dans [141], les auteurs ont proposé une nouvelle technique d'optimisation hybride multi-objectifs pour assurer la communication entre les drones dans un réseau ad hoc volant (FANET), nommé MOHOQ-FANET. Cette solution combine l'optimisation des colonies de fourmis (ACO) et l'optimisation des essaims de particules (PSO). Afin d'assurer un routage efficace dans les réseaux FANETs, il est essentiel de garantir la fiabilité du protocole de routage ad hoc basé sur le vecteur de demande (RAODV). L'algorithme ACO est utilisé pour identifier initialement le chemin le plus court dans le réseau, tandis que l'optimisation PSO est appliquée pour obtenir une solution optimale lors de la communication entre les drones volants. Le protocole MOHOQ-FANET est comparé à des approches précédentes telles que CSPO-FANET et OSNP-FANET. Les résultats expérimentaux démontrent que cette approche améliore significativement le taux de livraison des paquets et le débit réseau, tout en réduisant le délai inter-hôte et la surcharge de routage. Cependant, l'évaluation de cette approche ne prend pas en compte les contraintes liées à l'énergie des drones et à la stabilité des liens.

4.4.2.3 Protocoles de routage basés sur l'algorithme d'optimisation de l'élevage des éléphants

1. Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre dans les réseaux MANETs afin d'optimiser l'efficacité énergétique du routage entre les nœuds mobiles. Dans [142], les auteurs ont proposé un protocole de routage écoénergétique basé sur le protocole de routage multi-chemins AOMDV et l'algorithme bio-inspiré appelé Elephant Herding Optimization (EHO). Avant la découverte des chemins du protocole EHO-AOMDV, la méthode bio-inspirée EHO optimise la consommation énergétique globale des nœuds en les répartissant en deux catégories, tout en déterminant les chemins à partir de la catégorie des nœuds test qui dispose d'une énergie suffisante pour le transfert afin de diminuer le risque d'échec des chemins et l'accroissement du nombre de nœuds morts suite à des charges de données plus élevées. Une fois les nœuds classés, le processus de découverte des chemins disjoints commence en utilisant le protocole AOMDV. L'opérateur de mise à jour EHO ajuste les classes en se basant sur l'opérateur de séparation qui juge les nœuds selon leur énergie résiduelle suite à chaque cycle de transmission. Si tous les chemins échouent ou en cas de perte d'énergie des nœuds des parcours identifiés, le processus de classification des nœuds doit être relancé à nouveau. Durant cette étape, l'opérateur de mise à jour réexamine l'énergie de

chaque nœud dans les deux clans pour actualiser la situation des nœuds épuisés, ceux qui ont perdu en énergie et ne disposent plus d'assez de puissance pour transmettre, ainsi que ceux qui ont accumulé suffisamment d'énergie pour assurer le transfert du premier clan vers le second et vice versa. Cette opération précède une nouvelle relance du processus de recherche des chemins. La répartition de la charge de données est alors effectuée sur le nombre des chemins identifiés en fonction du pourcentage d'énergie du chemin comparé à l'ensemble des énergies des chemins identifiés. Les expériences ont été menées à l'aide du simulateur $Ns-3$, mettant en œuvre quatre (04) protocoles, à savoir : EHO-AOMDV proposé, AOMDV, ACO-FDRPSO et FF-AOMDV. Les résultats ont montré que le protocole suggéré surpasse les autres dans quatre métriques de performances sur cinq : surcharge de routage, taux de livraison des paquets, énergie consommée en moyenne et nombre de nœuds inactifs, alors que concernant le temps d'acheminement global, l'EHO-AOMDV a présenté un délai acceptable par rapport à l'AOMDV. Les conclusions ont aussi indiqué que le protocole suggéré offrait de meilleures performances comparativement aux autres protocoles en termes de répartition de charge, ce qui se manifestait clairement par sa supériorité dans le rapport de transmission des paquets. Il est recommandé par les auteurs que l'EHO-AOMDV soit mis en œuvre de manière efficace dans les systèmes qui privilégient un taux de livraison de paquets plus élevé au délai, dans une optique de marketing et de gestion.

2. Dans [143], les auteurs ont suggéré une nouvelle méthode d'agrégation de données adaptée aux réseaux de capteurs IoT afin d'optimiser le rendement des cultures en agriculture de précision. Toutefois, l'évolutivité représente un défi majeur lors du déploiement sur des réseaux plus vastes et plus denses. En effet, la plupart des nœuds IoT et des capteurs sans fil restent généralement actifs, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie et de la bande passante. Leur objectif principal est de concevoir un nouveau protocole de routage pour les réseaux IoT-WSN. À cette fin, un routage groupé économe en énergie, basé sur l'optimisation adaptative du regroupement d'éléphants (E2CR-AEHO), est proposé. Dans cette approche, les capteurs collectent des données et sélectionnent dynamiquement un ensemble de têtes de cluster (CH). L'algorithme AEHO ajuste la formation des CH en fonction de la consommation énergétique, minimisant ainsi la fréquence des reclusterings et s'adaptant efficacement aux variations de la topologie du réseau. Dans le modèle AEHOA, les nœuds du réseau peuvent choisir leurs CH en fonction de plusieurs critères, notamment la consommation d'énergie, la puissance résiduelle des capteurs, la fiabilité du réseau et la qualité des données. Cette approche permet une meilleure représentation de l'environnement réseau, évitant ainsi les chemins de routage passant par des zones fortement sollicitées. L'évaluation des performances repose sur des indicateurs spécifiques tels que le taux de livraison des paquets (PDR), la durée de vie du réseau (NL), le taux de perte de paquets (PLR) et le délai moyen de bout en bout (AE2E). Les résultats de simulation montrent que ce cadre optimise l'agrégation des données IoT, réduisant progressivement le volume de transmission et prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

4.4.2.4 Protocoles de routage basés sur l'algorithme de recherche coucou

1. Dans [93], les auteurs ont suggéré une nouvelle solution de routage dans les réseaux ad hoc, qui consiste à améliorer le protocole réactif AODV par la méthode bio-inspirée « la recherche Coucou (CS) ». La méta-heuristique est utilisée pour découvrir le meilleur chemin entre un nœud source et un nœud destination afin d'améliorer les performances. Le protocole repose sur deux parties : la première est celle de la Détection de la topologie et construction de population initiale de chemins qui est initié par le nœud source lorsqu'il a besoin d'obtenir une direction vers une destination et que cette information n'est pas accessible. Les auteurs ont apporté des modifications à la structure du paquet RREQ en intégrant un champ format tableau qui contient les identifiants des nœuds intermédiaires entre le nœud source et destination, pour élaborer une solution qui

représente un chemin. Après, une matrice d'adjacence illustrant les liens entre les nœuds ayant reçu les paquets de diffusions est élaborée, et cela en exploitant les données sur les connexions de communication entre les nœuds intermédiaires présentes dans le nouveau champ. La deuxième partie repose sur la gestion de routage, qui implique la mise en œuvre de l'algorithme de recherche coucou sur la population formée lors de l'étape précédente. La recherche Coucou est employée pour affiner (optimiser) la recherche des chemins entre deux nœuds. L'objectif qui a été optimiser avec cette méthode est le nombre de sauts nécessaires pour parvenir à la destination. La valeur de la fonction objectif est déterminée à partir du nombre de sauts (`rq_hop_count`) dans le paquet RREQ pour les solutions initiales et elle est calculée pour les nouvelles solutions obtenues via le vol de Lévy. Cette méthode est appliquée aux nœuds intermédiaires pour produire de nouvelles solutions de type réel. Puisque les solutions sont des entiers positifs. Les auteurs ont adopté une méthode aléatoire pour convertir les valeurs réelles en entiers.

L'objectif principal du protocole de routage AODV-CS est d'améliorer l'efficacité du routage dans les réseaux ad hoc avec qualité de service à l'aide d'une méthode méta-heuristique CS. Après les tests et comparaisons de ce protocole par rapport à AODV, DSDV et AntHocNet, les résultats obtenus ont été très encourageants. En fait, ils prouvent l'efficacité de l'algorithme CS dans le traitement de problèmes de routage dans les réseaux MANETs. L'examen des performances obtenues pour une variété de nombres de nœuds démontre que l'AODVCS est un protocole évolutif, car il continue à produire de bons résultats même lorsque le nombre de nœuds s'accroît. Ainsi, ce protocole AODVCS présente des performances satisfaisantes et supérieures à celles des protocoles AODV, DSDV et AntHocNet en ce qui concerne le taux de livraison de paquets et le délai de bout en bout. Cependant, cette solution est inadaptée aux réseaux MANETs dynamiques en raison de son manque de prise en compte de la stabilité des liens, de la consommation énergétique et de la congestion du réseau. Une approche plus robuste devrait intégrer plusieurs métriques d'optimisation telles que la puissance résiduelle des nœuds, la qualité des liens et la stabilité des chemins afin d'améliorer la fiabilité et l'efficacité du routage.

2. Dans [144], les chercheurs ont suggéré une nouvelle version optimisée du protocole hybride de routage hiérarchique par zone (ZHRP), intégrant l'algorithme de recherche coucou dynamique DCS (Dynamic Cuckoo Search), nommée ZHRP-DCSEI. Cet algorithme a été développée afin d'améliorer la sélection des chemins et l'efficacité énergétique dans les réseaux MANETs. Dans un premier temps, l'algorithme DCS est appliqué au ZHRP pour identifier et maintenir les chemins optimaux pour chaque nœud. Ensuite, la stabilité des liens sans fil est évaluée grâce à cette approche métaheuristique. L'algorithme DCS utilise un paramètre de commutation dynamique permettant d'ajuster l'équilibre entre exploration globale et exploitation locale à travers des marches aléatoires. Différentes variantes de ce paramètre, telles que la décroissance linéaire, la croissance linéaire, la croissance exponentielle et l'augmentation de puissance, sont intégrées à l'algorithme de recherche coucou pour optimiser les performances du routage dans les réseaux MANETs. Les résultats de simulation démontrent que l'approche hybride proposée, basée sur la recherche coucou dynamique, améliore significativement les performances du routage hiérarchique par zone en réduisant la consommation énergétique, en diminuant le délai moyen, et en augmentant le taux de livraison des paquets ainsi que le débit réseau. Enfin, les simulations révèlent que la variante DCS avec un paramètre de commutation à croissance exponentielle offre les meilleures performances par rapport aux autres déclinaisons de l'algorithme.
3. Dans [145], les auteurs ont proposé un nouveau protocole de routage visant à optimiser la consommation d'énergie en combinant l'algorithme d'optimisation Coucou et l'algorithme multicritère TOPSIS. L'approche développée est adaptée aux environnements dynamiques et prend en compte quatre paramètres clés : la bande passante disponible, l'énergie résiduelle, la vitesse de déplacement des nœuds, et le nombre d'étapes nécessaires au routage. Cette solution est composée en trois phases : la première consiste à sélectionner les nœuds relais les plus appropriés pour la

transmission des paquets de données. La sélection est effectuée à l'aide de l'algorithme TOPSIS, en fonction de la distance à la destination, du volume de travail effectué, du nombre de nœuds voisins et de l'énergie restante dans les nœuds. La deuxième phase, dite phase de routage, consiste à sélectionner le chemin le plus court parmi les chemins formés lors de la phase précédente grâce à l'algorithme d'optimisation coucou. La troisième phase, appelée « Maintien du chemin », consiste à envoyer un message d'accueil à leurs voisins. Si ces voisins ne sont pas à portée en raison d'une erreur ou d'une panne de batterie, ils ne répondent pas au message. Le nœud est ensuite informé de cet échec et utilise un chemin alternatif trouvé lors de la phase de routage par l'algorithme d'optimisation coucou. Les résultats de simulation montrent que la sélection d'un chemin stable en combinant ces deux approches améliore significativement les performances du réseau. Comparé à d'autres méthodes proposées, l'algorithme développé offre un meilleur débit et un délai de bout en bout réduit, démontrant ainsi son efficacité supérieure en termes de routage dans les réseaux dynamiques. Cependant, le protocole proposé n'a pas été testé dans un réseau MANET à très forte densité et à grande mobilité.

4.4.2.5 Protocoles de routage basés sur l'algorithme de colonie d'abeilles artificielle

1. Dans [146], les auteurs ont suggéré un protocole de routage ABC-CSO qui repose sur l'utilisation conjointe des algorithmes d'optimisation des colonies d'abeilles artificielles (ABC) et par essaim de poules (CSO), dans le but d'optimiser la consommation d'énergie et d'assurer une collecte de données efficace au sein des réseaux de capteurs corporels sans fil (WBANs). Ce protocole se divise en trois phases principales : le regroupement des capteurs en clusters, la sélection du chef de cluster (CH), et la transmission des données agrégées vers la station de base (BS). Dans la première phase, les capteurs corporels portables sont regroupés en plusieurs groupes. Ensuite, l'algorithme ABC est utilisé pour sélectionner le meilleur chef de cluster (CH) pour chaque groupe en fonction de critères tels que la proximité du nœud et l'énergie résiduelle. Une fois les chefs de clusters définis, chaque capteur envoie ses données au nœud relais (RN) ou au CH. Dans la troisième phase, l'algorithme CSO intervient pour acheminer les données agrégées vers la station de base (BS), en optimisant le chemin de transmission en fonction de la distance et de l'énergie résiduelle des capteurs. Le protocole ABC-CSO permet ainsi de réduire la consommation d'énergie dans le réseau, tout en équilibrant les besoins énergétiques entre les capteurs. Les résultats des simulations montrent que cette méthode est capable de gérer efficacement des architectures WBANs en évolution rapide, tout en maintenant un bon équilibre entre la consommation d'énergie et la fiabilité des données transmises. En outre, les simulations démontrent que l'algorithme proposé surpasse des protocoles de routage classiques tels que l'Optimisation par Colonies de Fourmis (ACO), l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO), l'Optimisation par Abeilles Artificielles (ABC), et l'Optimisation par Loups Gris (GWO) en termes de débit. Néanmoins, l'utilisation conjointe des algorithmes d'optimisation ABC et CSO peut entraîner une complexité de calcul relativement élevée, notamment lorsqu'il s'agit de gérer de grands réseaux WBANs avec un grand nombre de capteurs. Ainsi, l'agrégation des données et le routage via les chefs de cluster et les nœuds relais peuvent entraîner une augmentation de la latence dans le réseau, surtout si plusieurs étapes de communication sont nécessaires avant d'atteindre la station de base.
2. Dans [147], les auteurs ont suggéré un protocole de routage AODV optimisé pour les colonies d'abeilles artificielles résilientes, nommé RABCO-AODV-RP. Ce protocole est conçu pour résoudre les défis énergétiques dans les réseaux ad-hoc volants (FANETs), qui sont caractérisés par des ressources limitées et une dynamique de réseau complexe. Le protocole intègre l'algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles artificielles (ABC) au protocole de routage AODV

pour améliorer l'efficacité énergétique tout en maintenant la résilience du réseau. Le protocole RABCO-AODV-RP fonctionne en deux phases principales : la découverte du chemin et la maintenance du chemin. Dans la phase de découverte, l'algorithme ABC est utilisé pour optimiser la sélection des chemins en tenant compte non seulement de la distance entre les nœuds, mais aussi de la consommation énergétique. L'ABC choisit ainsi des chemins qui réduisent la consommation d'énergie, prolongeant la durée de vie des nœuds. Lors de la phase de maintenance, le protocole surveille en continu l'état du réseau et ajuste les chemins en fonction des changements dynamiques, comme les défaillances de nœuds ou la variation de l'énergie restante. Si nécessaire, l'algorithme recalculera des chemins alternatifs pour maintenir une communication fiable et efficace, garantissant ainsi la résilience et l'optimisation énergétique du réseau à long terme. Les résultats des simulations effectuées ont montré que le protocole RABCO-AODV-RP surpassait le protocole AODV traditionnel en termes de plusieurs critères de performance tels que le taux de livraison des paquets, le taux de perte de paquets, le débit, le délai de bout en bout, la consommation énergétique et le nombre de sauts. Cependant, une telle approche ignore d'autres facteurs essentiels tels que la stabilité des liens et la qualité des liens.

4.5 Discussion

Les réseaux sans fil mobiles présentent des défis complexes en matière de routage en raison de la nature dynamique des nœuds, de la variabilité des connexions et des contraintes de ressources. Pour répondre à ces défis, les algorithmes bio-inspirés ont été largement adoptés dans la conception de protocoles de routage, s'inspirant des comportements naturels observés chez les animaux comme par exemple les colonies de fourmis, les essaims d'abeilles, les lucioles, les chauves-souris et d'autres systèmes biologiques. Ces approches permettent d'optimiser divers critères tels que la consommation d'énergie, la latence, la stabilité des chemins et la fiabilité des transmissions.

Cette comparaison (voir Tableau 4.1) vise à analyser quelques protocoles de routage basés sur des algorithmes bio-inspirés, en mettant en évidence leurs spécificités, leurs avantages et leurs limitations. En évaluant différents protocoles selon les critères d'optimisation, nous cherchons à identifier les solutions les plus adaptées à chaque type de réseau sans fil mobile et à mieux comprendre les compromis qu'elles impliquent en termes de performance et de complexité.

Algorithme bio-inspiré	Protocoles de routage	Réseau	Optimisation principale	Avantages	Inconvénients	Mobilité	Protocoles de comparaison
Évolution différentielle	DE_AOMDV	MANET	Sélection de route multi-chemins	Bonne gestion des chemins multiples	Complexité algorithmique élevée	Élevée	AOMDV
	DEO	MANET	Optimisation énergétique	Réduction efficace de la consommation énergétique	Peut ralentir la découverte des chemins	Moyenne	PSO, GA
	DECA	WSN	Fiabilité et énergie	Améliore la robustesse et la durée de vie du réseau	Temps de convergence élevé	Élevée	GA, DE, EELBCA, LBC, GLBCA
Algorithme génétique	AOMDV-GA	MANET	Optimisation multi-chemins	Bonne répartition de la charge	Consommation énergétique moyenne	Moyenne	AOMDV-FFn, FF-AOMDV, AOMDV, AODV
	GA-AOMDV	WSN	Optimisation des chemins	Meilleure adaptation aux changements topologiques	Complexité algorithmique élevée	Élevée	AODV, DSR, EPAR, EPAR-BFS
	GAR	FANET	Sélection de chemin robuste	chemins plus résistants aux pannes	Latence potentiellement élevée	Moyenne	AODV, DSR
	MEGA	WSN	Optimisation multi-objectifs	Excellente optimisation de plusieurs critères	Demande de ressources plus importante	Élevée	OLSR, LEACH, BATMAN
Algorithme ACO	AOERP	MANET	Sélection de chemin basé sur les phéromones	Bonne adaptabilité à la mobilité	Dépendance aux paramètres des phéromones	Moyenne	EPAAODV, K-means-AODV-ACO
	MACO-QCR	WSN	Optimisation énergétique et qualité de service	Apprentissage adaptatif amélioré	Complexité computationnelle élevée	Élevée	IAMQER, O_ARA

Suite page suivante...

Tab. 4.1 – Suite

Algorithme bio-inspiré	Protocoles de routage	Réseau	Optimisation principale	Avantages	Inconvénients	Mobilité	Protocoles de comparaison
	AOMDV-ACOPSO	MANET	Sélection de chemin adaptatif	Équilibrage entre énergie et performances	Sensibilité aux paramètres PSO	Élevée	AODV, AOMDV, ACO-AOMDV, PSO-AOMDV
Algorithme PSO	PERS	MANET	Réduction de la consommation énergétique	Bonne gestion de l'énergie	Moins performant en forte mobilité	Moyenne	TIGHT, PS-ROGR
	MOHOQ-FANET	FANET	Optimisation multi-objectifs	Optimisation avancée pour FANET	Complexité computationnelle importante	Élevée	CSPO-FANET, OSNP-FANET
Algorithme EHO	EHO-AOMDV	MANET	Sélection de chemin optimal	Bonne convergence et fiabilité	Complexité accrue avec un grand nombre de nœuds	Moyenne	ACO-FDRPSO, FF-AOMDV, AOMDV
	E2CR-AEHO	WSN	Économie d'énergie et robustesse	Excellente gestion énergétique	Implémentation plus complexe	Élevée	
Algorithme CS	AODVCS	MANET	Recherche du meilleur chemin	Algorithme efficace pour la sélection des chemins	Peut être instable sous forte mobilité	Moyenne	AntHocNet, AODV, DSDV
	ZHRP-DCSEI	MANET	Hiérarchisation des chemins	Bonne gestion des zones de routage	Nécessite une maintenance régulière	Élevée	ZHRP-DCSCo, ZHRP-DCSLD, ZHRP-DCSLI, ZHRP-DCSPI
	CBTRP	MANET	Sélection multi-critères du meilleur chemin	Meilleur compromis entre robustesse et énergie	Calcul complexe de TOPSIS	Très élevée	RLRA, FLRA, CLRA, RLFLRA

Suite page suivante...

TAB. 4.1 – Suite

Algorithme bio-inspiré	Protocoles de routage	Réseau	Optimisation principale	Avantages	Inconvénients	Mobilité	Protocoles de comparaison
Algorithme ABC	ABC-CSO	WBANs	Optimisation énergétique	Optimisation hybride performante, Amélioration de la durée de vie du réseau et réduction de la consommation énergétique	Complexité algorithmique élevée, Manque d'adaptabilité aux environnements hautement bruités, Critère de sélection principalement énergétique	Faible	ACO,PSO, ABC,GWO
	RABCO-AODV-RP	FANET	Optimisation énergétique, Amélioration de la résilience réseau	réduction de la consommation énergétique	Critère d'optimisation limité à l'énergie, Complexité computationnelle accrue	Moyenne	AODV

TAB. 4.1 – Performance des protocoles bio-inspirés analysés dans le cadre de cette thèse

4.6 Conclusion

Le routage dans les réseaux MANETs constitue l'un des défis fondamentaux en raison de la nature dynamique et décentralisée de ces environnements. Assurer une qualité de service acceptable dans un tel contexte requiert des stratégies d'optimisation robustes, capables de s'adapter aux changements fréquents de topologie, à la mobilité des nœuds, ainsi qu'à la limitation des ressources énergétiques.

Face aux limites des approches traditionnelles, les méthodes d'optimisation bio-inspirées, issues de l'observation de phénomènes naturels, ont suscité un intérêt croissant dans la communauté scientifique. Leur capacité à explorer efficacement un vaste espace de solutions, à s'adapter aux conditions variables du réseau, et à fournir des solutions proches de l'optimal en un temps raisonnable, en fait des candidates sérieuses pour le problème de routage dans les réseaux MANETs.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un panorama des principales approches bio-inspirées appliquées au routage, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites. Une analyse comparative a permis de dégager les tendances actuelles, les critères d'évaluation les plus pertinents (tels que la consommation énergétique, la stabilité des liens, la latence, et le taux de livraison), ainsi que les axes potentiels d'amélioration.

Ce travail de synthèse constitue le socle de notre démarche expérimentale. Il oriente la conception de nouveaux protocoles de routage que nous proposons dans les chapitres suivants. Le prochain chapitre introduit notre première contribution : la mise en œuvre de deux protocoles de routage multi-chemins, basés sur l'algorithme d'évolution différentielle, et spécifiquement adaptés aux contraintes des réseaux MANETs.

partie II
Contributions

Chapitre 5

Protocoles de routage multi-chemins SDERP et ES-RPDE

Contents

5.1 Introduction	97
5.2 Le protocole de routage multi-chemins SDERP	98
5.2.1 Présentation du protocole de routage SDERP	99
5.2.2 Évaluation des performances du protocole SDERP	107
5.3 Le protocole de routage multi-chemins ES-RPDE	114
5.3.1 Présentation du protocole de routage ES-RPDE	115
5.3.2 Évaluation des performances du protocole ES-RPDE	117
5.4 Conclusion	120

Référence :

1. Mekkaoui Abdelkader, Smail Omar, et Rebbah Mohammed : SDERP : Stable-aware differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks. *International Journal of Communication Systems*, 2025, vol. 38, no 4, p. e6000.
2. Mekkaoui Abdelkader, Smail Omar, et Rebbah Mohammed : Energy Aware and Link-Stability Routing Protocol Based on Differential Evolution for MANETs. In : *2024 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. IEEE, 2024. p. 66-71.

5.1 Introduction

Un réseau MANET (mobile ad hoc) est un réseau à communications non filaires et à administration non centralisée où tous ses nœuds sont mobiles. Tout d'abord, l'un des principaux inconvénients des réseaux sans fil est leur consommation énergétique, car les nœuds constitutifs du réseau ont une capacité de batterie restreinte, alors qu'une consommation plus importante est due à la mobilité des nœuds, à leur puissance de traitement, à l'envoi fréquent de données, etc. Deuxièmement, des paquets de données peuvent être perdus à cause du trafic, du bruit ou de la mobilité des nœuds, dont la transmission de données dans les applications temps réel serait compromise par cette perte.

Afin de résoudre le problème de la consommation énergétique et celui de la perte de paquets de données pour les réseaux MANET, nous avons proposé deux nouveaux protocoles de routage multi-chemins basés sur l'évolution différentielle. Le premier protocole est nommé SDERP (Stable-aware

differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks). Le processus d'évolution différentielle est exécuté au niveau du nœud source après la fin de la découverte des chemins. Une fois terminé, une nouvelle fonction de fitness est calculée pour sélectionner le meilleur nouveau chemin parmi tous les nouveaux chemins émis à la fin de l'algorithme ED. Cette fonction de fitness est basée sur des contraintes qui sont collectées durant le processus de découverte des chemins : l'énergie du nœud qui est estimée selon l'énergie résiduelle des nœuds inclus dans le chemin et la stabilité du lien qui est estimé en fonction de la mobilité des nœuds par l'application du coefficient de variation basé sur l'écart absolu moyen. Le deuxième protocole de routage est ES-RPDE (energy aware and link-stability routing protocol based on differential evolution for MANETs). Il s'appuie sur le même concept que le protocole SDERP en se basant sur la contrainte d'énergie des nœuds et de stabilité des liens, mais en appliquant la méthode d'évolution différentielle en cours de découverte des chemins, exactement au niveau de la destination. Une fois le processus bio-inspiré terminé, le nœud destination prend la charge de répondre à la source par l'envoi des messages de type RREP qui incluent la valeur de la fonction de fitness de chaque chemin. Le nœud source sélectionnera le meilleur chemin en se basant sur cette valeur de fitness. Nos deux solutions offrent la possibilité de choisir les chemins les plus fiables en optimisant la qualité des liaisons, ce qui renforce la fiabilité de la transmission, diminue le nombre d'interruptions de liens et préserve davantage d'énergie.

5.2 Le protocole de routage multi-chemins SDERP

Nous avons mentionné précédemment que le routage est l'un des problèmes sous-jacents des réseaux sans fil. C'est un processus de découverte d'un ou plusieurs chemins entre un nœud source et un nœud destination pour permettre le transfert de paquets de données. Ce processus est extrêmement complexe pour plusieurs raisons, notamment la topologie dynamique pour la mobilité des unités qui constituent le réseau, les fortes contraintes énergétiques, la bande passante limitée, les interférences entre les hôtes du réseau et les vulnérabilités de sécurité.

Les protocoles de routage basiques peuvent être classés en trois catégories selon le processus de découverte des chemins. Cette découverte est basée sur une métrique qui est le nombre de sauts. Cette métrique ne reflète pas toujours le meilleur chemin optimal, étant donné la négligence de toutes les limitations des réseaux sans fil mobiles, à savoir l'énergie du nœud, la bande passante, la stabilité de la liaison et la qualité du signal. D'autres métriques ont été proposées dans de nouvelles études, dont le but est d'améliorer le routage multi-chemins dans les réseaux sans fil.

Dans l'abondance des travaux de recherche sur les réseaux sans fil, une seule des métriques précédentes a été optimisée ; on parle alors de problème à objectif unique. En revanche, l'optimisation multi objectives optimise simultanément plusieurs métriques. Le résultat d'un problème d'optimisation multicritère est généralement un assortiment de solutions qui se distinguent par les différents compromis effectués entre les objectifs. Cet assortiment est connu sous le nom de pareto optimal [148]. Pour résoudre ce problème multi objectif, les chercheurs [149][150] sont inspirés de la nature pour découvrir de nouveaux phénomènes naturels réalisés par différents organismes soit en groupe, soit individuellement. Une nouvelle ère est apparue avec la naissance des algorithmes bio-inspirés, qui sont devenus une source inépuisable d'inspiration dans le domaine des réseaux mobiles sans fil.

Pour cela, nous avons implémenté un nouveau protocole de routage multi-chemins SDERP [24] (stable-aware differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks) pour les réseaux ad hoc. Ce protocole se base sur la méthode évolutionnaire évolution différentielle en prenant compte deux contraintes : l'énergie du nœud et la stabilité de lien. Ces contraintes sont combinées par une fonction de fitness pour classer les nouveaux chemins trouvés après la fin de l'algorithme bio-inspiré, afin de sélectionner le chemin le moins économique en énergie et le plus stable.

Le choix d'un chemin stable basé sur ces deux contraintes nous permet d'optimiser les performances du réseau ad hoc tout en prolongeant la durée de vie de le chemin choisi, réduisant ainsi le nombre d'interruptions de liens responsables des pertes de paquets. Les résultats de la simulation indiquent que notre protocole SDERP améliore les performances du réseau ad hoc et apporte une fiabilité accrue comparé à certains protocoles récents, tels que OPAOMDV-EE [69], FT-AORP [90], EE-LB-AOMDV [73] et AOMDV [54].

5.2.1 Présentation du protocole de routage SDERP

Fonctions d'énergie et de stabilité

L'un des objectifs majeurs d'un réseau sans fil mobile est l'optimisation de l'énergie des batteries de l'ensemble des appareils qui composent ce réseau. La limite de ces batteries et les mouvements aléatoires avec des vitesses différentes des nœuds provoquent une dégradation du fonctionnement du réseau en termes de durée de vie. Il est très important de minimiser l'énergie consommée afin d'améliorer le fonctionnement du réseau. De plus, en raison de la grande mobilité, les liens peuvent être rompus et les données transmises perdues. Lors de la transmission de paquets de données, le choix du meilleur chemin est essentiel : celui qui est le plus stable et consomme le moins d'énergie. Or, un protocole de routage multi-chemins qui inclut un algorithme d'optimisation de chemin pour le processus de communication est souhaité.

1. **La solution proposée** Lors de la découverte des chemins par des protocoles réactifs, le nœud source déclenche un processus de découverte des chemins vers le nœud destination en diffusant un message de type RREQ. Parmi ces chemins, le protocole choisit celui avec un nombre de sauts le plus faible. Dans notre approche, nous proposons un protocole de routage qui utilise un algorithme d'évolution différentielle bio-inspiré appelé SDERP. Dans cette proposition, lorsque les chemins sont découverts, le nœud émetteur devra trouver le chemin le plus stable en introduisant une nouvelle fonction de fitness. En d'autres termes, cette fonction de fitness prendra en compte deux paramètres :

- L'énergie résiduelle des nœuds inclus dans un chemin.
- La stabilité des liens qui constituent un chemin.

2. **Le Modèles du systèmes (ou Les modèles du système)**

Nous considérons un réseau sans fil comme un graphe $G(N, L)$. Le Tableau 5.1 présente la notation utilisée dans ce chapitre. La distance à l'instant t entre deux nœuds n_i aux coordonnées (x_i, y_i) et n_j aux coordonnées (x_j, y_j) est notée $D_{i,j}(t)$. Pour la calculer, nous utilisons la formule euclidienne suivante :

$$D_{i,j}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \quad (5.1)$$

3. **Les principales fonctions de la solution proposée**

Nous supposons que le problème de routage dans un MANET est comme un problème multi objectifs qui peut être modélisé mathématiquement. L'objectif est d'assurer le routage le long d'un chemin plus stable avec une énergie consommée minimale. Notre fonction objective dépend de deux paramètres : la fonction de stabilité du lien et la fonction d'énergie du nœud.

(a) **La fonction de stabilité du lien**

La mobilité des nœuds influence l'ensemble des chemins dans un MANET. Plusieurs protocoles de routage utilisent cette métrique qui se base sur un ensemble de critères, comme les coordonnées, les directions de déplacement et leurs vitesses. On utilise le premier critère pour évaluer la mobilité d'un lien, et qui sera calculée en temps réel. Pour quantifier la précision de la mesure, on utilise le coefficient de variation basé sur l'écart absolu moyen :

Notation	Définition
N_i	Nœud mobile
$L_{i,j}$	Lien entre les nœuds n_i et n_j
P_j	Chemin qui contient un ensemble de nœuds et de liens
$E_{i,j}$	Énergie résiduelle du nœud n_i appartenant au chemin P_j
$D_{i,j}$	Distance entre les nœuds n_i et n_j
fp_j	Fonction de fitness du chemin P_j
fsp_j	Fonction de stabilité du chemin P_j
fep_j	Fonction d'énergie du chemin P_j
$fsl_{i,j}$	Coefficient de variation d'un lien entre les nœuds n_i et n_j
$Ml_{i,j}$	Moyenne des n distances entre les nœuds n_i et n_j
$SDl_{i,j}$	Écart absolu moyen des distances enregistrées entre les nœuds n_i et n_j
$fen_{i,j}$	Fonction d'énergie du nœud n_i appartenant au chemin P_j
$Elev_{i,j}$	Niveau d'énergie du nœud n_i appartenant au chemin P_j

TAB. 5.1 – Tableau de notation.

$fsl_{i,j}(t)$, qui est une mesure standardisée pour calculer la dispersion d'une distribution de probabilité. S'il tend vers 1, alors on en déduit qu'on a une mauvaise distribution des distances; cela signifie que le lien est instable. S'il tend vers 0, on en déduit qu'on aura une bonne distribution des distances; cela signifie que le lien est stable. La formule suivante est utilisée pour le calculer à l'instant t :

$$fsl_{i,j}(t) = \frac{SDl_{i,j}(t)}{Ml_{i,j}(t)} \quad (5.2)$$

où la valeur de $Ml_{i,j}(t)$ à l'instant t est donnée par :

$$Ml_{i,j}(t) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)}{n} \quad (5.3)$$

Pour faciliter le calcul et l'interprétation de toute distribution de données, nous utilisons $SDl_{i,j}(t)$, donnée par :

$$SDl_{i,j}(t) = \frac{1}{n} \times \sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)| \quad (5.4)$$

La fonction de stabilité des liens du chemin P_j à l'instant t sera maximisée et elle est calculée par rapport à l'ensemble des valeurs $fsl_{i,j}(t)$ des liens constituant ce chemin, donné par :

$$fsp_j(t) = \frac{n-1}{\max_{i=1}^{n-1}(fsl_{i,j}(t))} \quad (5.5)$$

- (b) **La fonction d'énergie** Nous considérons l'énergie résiduelle $E_{i,j}(t)$ d'un nœud n_i comme un facteur pour mesurer la fonction énergétique d'un chemin P_j . La fonction énergétique d'un nœud n_i à l'instant t est donnée par :

$$fen_{i,j}(t) = \frac{Elev_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t)} \quad (5.6)$$

$Elev_{i,j}(t)$ est calculé par :

$$Elev_{i,j}(t) = \frac{E_{i,j}(t)}{E_{average,j}(t)} \quad (5.7)$$

$E_{average,j}(t)$ est l'énergie résiduelle moyenne des nœuds qui participent à la constitution du chemin P_j à l'instant t entre le nœud source et le nœud destination. Chaque nœud n_{j_i} du chemin P_j contient son propre débit de drain, noté $DR_{i,j}(t)$, qui diffère selon le taux EC du fait de l'utilisation du nœud par plusieurs chemins.

La fonction énergétique d'un chemin P_j à l'instant t est le minimum des coûts énergétiques $fen_{i,j}(t)$ des nœuds inclus dans ce chemin :

$$fep_j(t) = \min_{i=1}^{n-1} (fen_{i,j}(t)) \quad (5.8)$$

(c) **La fonction de fitness**

Comme expliqué dans l'algorithme 9, la fonction fitness dépend de deux paramètres, à savoir : la fonction de stabilité du lien et la fonction énergétique. Sa formule est :

$$fp_j(t) = \alpha \times fep_j(t) + \frac{\beta}{fsp_j(t)} \quad (5.9)$$

où, $\alpha + \beta = 1$.

```

1  début
2  |   Entrées :
3  |   Tableau de chemins sorti après ED.
4  |    $fsp_j(t)$  // La fonction de stabilité du  $jme$  chemin.
5  |    $fep_j(t)$  // La fonction d'énergie du  $jme$  chemin.
6  |    $Nbpath$  // Le nombre de chemins découverts.
7  |   sortie :
8  |   Tableau de valeurs de fonction de fitness  $fp_j(t)$ .
9  |   pour ( $j = 0; j \leq (Nbpath - 1), j++$ ) faire
10 |       Calculer  $fsp_j(t)$ .
11 |       Calculer  $Fep_j(t)$ .
12 |        $Fp_j(t) \leftarrow \alpha \times fep_j(t) + \frac{\beta}{fsp_j(t)}$ 
13 |   fin
14 fin
    
```

Algorithme 9 : Calcul de la fonction de fitness.

L'objectif est de trier tous les chemins obtenus par le protocole SDERP par valeur décroissante de $fp_j(t)$. Les paquets de données sont envoyés par les chemins ayant la plus grande valeur de $fp_j(t)$.

En utilisant les équations (5) et (8), $fp_j(t)$ devient :

$$fp_j(t) = \alpha \times \min_{i=1}^{n-1} \left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} \right) + \frac{\beta}{\max_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right)}$$

Puisque nous avons :

$$\min_{i=1}^{n-1} \left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} \right) \leq \frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)}$$

nous obtenons alors :

$$\begin{aligned}
 fp_j(t) &\leq \alpha \times \left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} \right) + (1 - \alpha) \times \frac{1}{\max_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right)} \\
 fp_j(t) &\leq \alpha \times \left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} - \frac{1}{\max_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right)} \right) \\
 &\quad + \frac{1}{\max_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right)} \tag{5.10}
 \end{aligned}$$

Puisque $D_{i,j}(t)$ est la distance et $Ml_{i,j}(t)$ est la moyenne des distances, nous avons $D_{i,j}(t) > 0$ et $Ml_{i,j}(t) > 0$.

Nous en déduisons que :

$$\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \leq 1$$

Nous obtenons pour l'équation (5.10)

$$fp_j(t) \leq \alpha \times \left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} - \frac{1}{\max_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right)} \right) + 1$$

Puisque nous avons $1 + x \leq \exp(x)$, nous obtenons

$$\begin{aligned}
 fp_j(t) &\leq \exp \left(\alpha \times \left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} - \frac{1}{\max_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right)} \right) \right) \\
 &\leq \exp \left(\alpha \times \frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} \right)
 \end{aligned}$$

Nous savons que $\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)} \geq 0$, et puisque nous avons :

$$e^{t\alpha} \leq 1 - \alpha + \alpha \times e^t \quad \text{pour } t > 0 \text{ et } 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (\text{see } [151])$$

Nous obtenons :

$$fp_j(t) \leq 1 - \alpha + \alpha \times \exp\left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)}\right)$$

$$fp_j(t) \leq \beta + \alpha \times \exp\left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)}\right)$$

Puisque nous avons $\alpha \leq 1$, nous obtenons :

$$fp_j(t) \leq \beta + \exp\left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)}\right)$$

Nous avons alors :

$$\beta \geq fp_j(t) - \exp\left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)}\right) \quad (5.11)$$

Et aussi comme $0 \leq \beta \leq 1$, et :

$$\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \leq 1$$

nous obtenons alors :

$$0 \leq \beta \times \left(\frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|}{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)} \right) \leq 1$$

Nous avons donc :

$$\beta \leq \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|} \quad (5.12)$$

Des équations (5.11) et (5.12), nous en déduisons que :

$$\beta \in \left[fp_j(t) - \exp\left(\frac{E_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t) \times E_{average,j}(t)}\right), \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)|} \right] \quad (5.13)$$

Lorsque nous devons optimiser conjointement plusieurs objectifs, nous nous trouvons face à un problème d'optimisation multi objectifs. Dans notre solution, deux objectifs sont définis : la fonction énergétique et celle de la fonction de stabilité du lien. Ces deux objectifs sont chacun liés à un coefficient de pondération. La configuration de ce coefficient de pondération est importante et difficile, car chaque coefficient est inclus dans un intervalle compris entre 0 et 1 et leur somme doit être égale à 1. Cette démonstration théorique vise à trouver un intervalle de valeurs de α et de β pour lequel nous aurons des solutions correspondant le mieux à nos préférences. Par exemple, lorsque l'on travaille dans un domaine qui nécessite des économies d'énergie, on utilise le coefficient α pour y attacher de l'importance.

Implémentation du protocole SDERP

Pour mieux comprendre l'algorithme SDERP, nous supposons que tous les nœuds sont identifiés par un *Id* unique et que chacun d'entre eux possède une valeur d'énergie résiduelle (pas nécessairement la même). Nous supposons également qu'un seul nœud source *S* peut déclencher le processus de découverte des chemins et qu'un seul nœud destination *D* est ciblé.

1. Processus de découverte des chemins

Le protocole SDERP vise à trouver un ensemble de chemins pour établir une communication entre le nœud source et le nœud destination. Il utilise les mêmes messages de contrôle que le protocole de base AOMDV [54] deux types de messages, Route Requests (RREQs) et Route Repls (RREP), utilisés lors de la découverte et deux autres messages, Route Error (RERR) et Hello, utilisés dans le processus de maintenance des chemins.

Des modifications sont apportées à ces messages de contrôle afin qu'ils puissent être adaptés à notre solution (fonction de calcul d'énergie et de stabilité); de nouveaux champs sont ajoutés en fonction de nos besoins. L'émetteur n_i ajoute, avant chaque transmission des paquets RREQ et Hello, trois informations : $E_{i,j}(t)$, x_i et y_i , qui sont respectivement son énergie résiduelle et ses coordonnées. Lorsqu'un paquet RREP est envoyé par le nœud n_i , un nouveau champ va être ajouté comprenant une matrice qui contient les informations de ce nœud et de tous ses voisins, avec leurs valeurs de stabilité et leurs énergies résiduelles.

Chaque nœud n_i contient une table de routage, comme indiqué dans la Figure 5.1, qui est modifiée en ajoutant la valeur de la fonction de fitness de chaque chemin $fp_j(t)$ dans la liste des chemins enregistrés dans la table de routage.

Destination
Sequence_number
Advertised_hopcount
Path_list
Expiration_timeout

FIG. 5.1 – Entrée de la table de routage SDERP.

Lorsque le nœud source souhaite transmettre des données à un nœud de destination bien défini, il vérifie d'abord sa table de routage pour voir si elle contient un chemin frais. Si c'est le cas, il envoie ses données à l'adresse du saut suivant (nexthop); sinon, il lance le processus de découverte des chemins pour tous ses voisins via un paquet RREQ et définit un temporisateur RREQ_Timer

pour détecter si le nœud de destination est inaccessible. Après la réception du paquet RREQ par un nœud intermédiaire, celui-ci compare son numéro de séquence (*sequence_number*) enregistré dans sa table de routage avec celui du paquet et s'assure que le nombre de sauts du paquet n'est pas supérieur au nombre de sauts annoncé (*Advertised_hopcount*). Si ces deux conditions sont remplies, le nœud diffuse le paquet à ses voisins. Dans le cas contraire, le nœud enregistre dans sa table de routage le chemin inverse avec un numéro de séquence plus élevé ; ils seront formés et répertoriés dans sa *path_list*. La liste des chemins enregistrés dans la table de routage contient tous les chemins inverses trouvés. Chaque chemin inverse a la structure suivante : *nexthop*, *hopcount*, *lasthop*, valeur de la fonction *fitness* ; voir Figure 5.2.

$Nexthop_1$	$Hopcount_1$	$Lasthop_1$	$f_{p_1}(t)$
$Nexthop_2$	$Hopcount_2$	$Lasthop_2$	$f_{p_2}(t)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$Nexthop_n$	$Hopcount_n$	$Lasthop_n$	$f_{p_n}(t)$

FIG. 5.2 – Structure de la liste de chemins de SDERP.

Le chemin inverse sera utile pour transmettre le paquet RREP. Les numéros de séquence permettent d'éviter les boucles lors de la découverte et d'assurer la fraîcheur des données dans la table de routage.

Le nœud de destination répond à tous les paquets RREQ reçus. Lorsqu'il reçoit le premier paquet RREQ, il répond au nœud source avec des paquets de type RREP : Il crée son chemin inverse vers le nœud source et envoie son paquet RREP avec ses nouvelles informations.

Chaque nœud intermédiaire doit vérifier le numéro de séquence du nœud source pour garantir la fraîcheur des données et éviter les boucles. Les chemins inverses qui sont sauvegardés seront supprimés de la table de routage une fois que le numéro de séquence RREP sera supérieur à celui de la table.

Au niveau du nœud source, nous définissons un timer *RREP_Timer* qui se déclenche à l'arrivée du premier paquet RREP. Ce timer est réglé pour interrompre l'envoi des données et attendre que d'autres paquets RREP soient collectés.

2. Processus d'évolution différentielle

Tous les chemins découverts sont mis à jour par un nœud à chaque fois qu'un chemin est reçu. Le choix du meilleur chemin a généralement été fait en fonction de la contrainte du nombre de sauts. Sa fiabilité est limitée dans les réseaux sans fil, ce qui nous a motivés à trouver de nouvelles méthodes d'amélioration de la durée de vie d'un réseau, d'où l'utilisation de la méthode d'évolution différentielle bio-inspirée. Le processus d'évolution différentielle est décrit en cinq étapes présentées ci-dessous : Algorithme 10 :

```

1  Entrées :
2  Tableau de chemins découverts.
3  sortie :
4  Tableau de nouveaux chemins  $NP[]$ .
5  début
6  |  $P_m \leftarrow 1$  // probabilité de mutation.
7  |  $P_c \leftarrow 1$  // probabilité de croisement.
8  |  $NP[] \leftarrow NULL$ 
9  |  $Fit \leftarrow Fep_j(t)$   $P_i, P_j$  // Chemins à partir de POP.
10 | pour chaque (chemin de la population) faire
11 | | tant que ( $P_i \leftarrow GP(POP)$ ) faire
12 | | | Mutation  $M(P_i)$ .
13 | | | Croisement  $C(P_i, P_j)$ .
14 | | | ‘ Calculer la nouvelle fonction de fitness  $Fit$ .
15 | | fin
16 | | pour chaque (nouveau chemin  $P_i$ ) faire
17 | | |  $NP[] \leftarrow NewP_i$ 
18 | | fin
19 | fin
20 fin
    
```

Algorithme 10 : Principe de l’algorithme d’évolution différentielle.

(a) **La phase d’initialisation**

Comme nous venons de le mentionner précédemment, lorsque le nœud source souhaite transmettre des paquets de données au nœud destination, il lance le processus de découverte. Lorsqu’il reçoit le premier chemin, arrivant par un RREP, il déclenche un timer pour collecter plus de chemins. La population initiale de l’algorithme d’évolution différentielle est l’ensemble des chemins bien reçus par le nœud source. Dans ce contexte, on note ce qui suit :

- Les gènes sont l’ensemble des nœuds d’un chemin ;
- Un chromosome est une solution possible au problème à optimiser (un chemin),
- POP désigne la population ; qui est définie comme la collection totale des chemins construits par AOMDV du nœud source au nœud destination,
- P_m est la probabilité de mutation d’un nœud d’un chemin défini,
- P_c est la probabilité que deux chemins se croisent.

(b) **La phase de mutation**

Le choix de la valeur P_m de la probabilité de mutation est lié au nombre de chemins résultant de la découverte. Le nombre de chemins étant faible, P_m est égal à 1. Dans notre protocole SDERP, un chemin est constitué d’un ou plusieurs liens. Pour chaque chemin sélectionné pour la phase de mutation, l’un de ces trois choix (insertion de nœud, échange de nœud ou suppression de nœud) sera appliqué. Il est à noter que le nœud source et le nœud de destination ne sont pas concernés par la phase de mutation, et le choix du lien à modifier dans un chemin est aléatoire pour ces trois modifications.

- **L’insertion d’un nœud :** l’ajout d’un nœud sera aléatoire, de sorte que le nouveau nœud sera inclus dans les deux listes de voisins des nœuds constituant le lien. Cette condition doit être exécutée pour éviter un processus de validation des chemins résultants.
- **L’échange d’un nœud :** le nœud échangé est un nœud en commun entre deux liens d’un chemin ; sa sélection est aléatoire, et son remplacement doit appartenir aux listes de voisins des deux autres extrémités des liens.

- **La suppression d'un nœud** : pour maintenir la validation du chemin lors de la suppression du nœud commun entre deux liens, les extrémités des liens doivent être proches l'une de l'autre.

(c) **La phase de croisement**

La phase de croisement va s'appliquer à deux chemins choisis aléatoirement avec une probabilité P_c égale à 1. Le nombre de nœuds croisés sera fixé à un (1), et ce nœud devra être commun entre ces deux chemins.

(d) **La phase de calcul de la fonction de fitness**

Pour chaque chemin construit dans la phase précédente, la valeur de la fonction de fitness est calculée par la formule 5.9.

(e) **La phase de validation et la sélection du meilleur chemin**

Après avoir calculé la fonction de fitness pour les nouveaux chemins issus de la phase de croisement, une phase de validation du chemin va être déclenchée. Cette phase va éliminer tous les chemins en double et sauvegarder tous les chemins valides avec leurs valeurs de fitness. Le meilleur chemin est alors celui qui possède la plus grande valeur de fitness.

Les algorithmes 10 et 9 illustrent notre protocole SDERP suggéré. Les multiples chemins découverts sont les entrées de l'algorithme 10. Pour obtenir les valeurs d'adéquation des nouveaux chemins, l'algorithme 10 utilise l'algorithme 9.

3. Processus de maintenance des chemins

Dans notre protocole de routage SDERP, la maintenance des chemins est effectuée en envoyant régulièrement des messages HELLO à des intervalles de temps T aux nœuds voisins ; le but est d'assurer la connectivité. Si un nœud n_i ne reçoit pas trois messages HELLO successifs d'un voisin n_j , le lien est considéré comme rompu. Un nœud n_i génère un message RERR (path Error) s'il détecte une défaillance de chemin vers un autre nœud n_j . Ce nœud n_j sera supprimé de la table de routage du nœud n_i et sera renvoyé par le chemin inverse jusqu'au nœud source. L'ensemble des nœuds inclus dans le chemin inverse supprime le chemin vers n_i et ceux qui l'utilisent comme saut suivant et retransmet le RERR au nœud source.

Les chemins qui correspondent à des nœuds non atteints sont supprimés de la table de routage du nœud source une fois qu'il reçoit le RERR. Le nœud source recherche l'existence d'un chemin alternatif menant au nœud de destination. Si aucun chemin n'est accessible, un nouveau processus de découverte des chemins et d'évolution différentielle est lancé.

Les étapes mentionnées ci-dessus du protocole de routage multi-chemins SDERP sont illustrées dans la figure suivante (Figure 5.3)

5.2.2 Évaluation des performances du protocole SDERP

Nous utilisons des simulations pour évaluer la fiabilité et l'efficacité de notre protocole SDERP. Pour décrire la topologie de notre réseau et ses paramètres, tels que le nombre de nœuds, le type de mobilité, la vitesse des nœuds et le type de protocole de routage utilisé, un script OTcl (Object-Oriented Tool Command Language) a été généré. À la fin de la simulation, nous pouvons visualiser notre réseau à l'aide d'un fichier NAM (Network Animator). Nous analysons les fichiers de trace pour observer les événements qui se produisent lors des simulations. Nous comparons notre protocole SDERP à quatre protocoles de routage existants, à savoir OPAOMDV-EE [69], FT-AORP [90], EE-LB-AOMDV [73] et AOMDV [54]. Ces protocoles ont été choisis pour les raisons suivantes :

- Ces protocoles sont implémentés dans les réseaux ad hoc (MANETs).
- Ces protocoles font partie de la famille des protocoles de routage réactif (à la demande).
- Ces protocoles sont des protocoles de routage multi-chemins, c'est-à-dire que plusieurs chemins sont enregistrés lors de la phase de découverte.

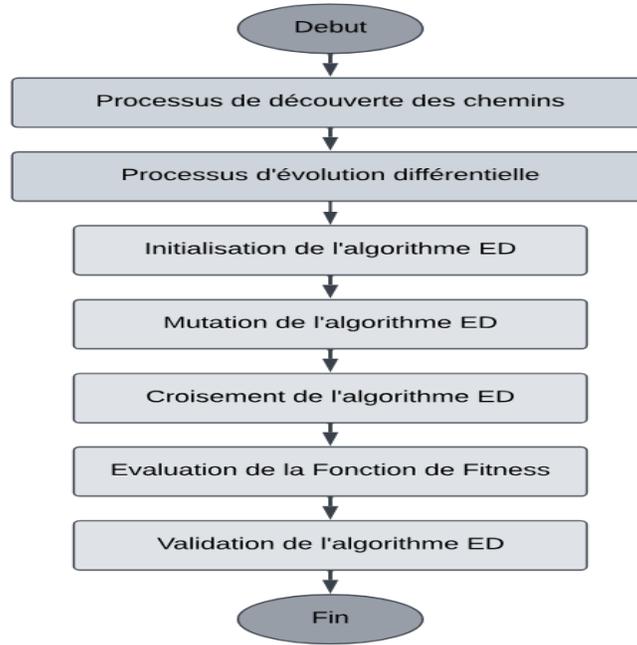


FIG. 5.3 – Organigramme du protocole de routage SDERP.

- Les trois protocoles de routage OPAOMDV-EE, FT-AORP et EE-LB AOMDV sont basés sur le calcul d'une fonction de fitness multi objective lors du choix du meilleur chemin pour transférer les paquets de données.

Environnement et paramètres de simulation

Pour mesurer les performances de SDERP, nous utilisons le simulateur réseau *NS2.35* et l'outil *BonnMotion* basé sur Java. Cet outil a la capacité de générer des scénarios de mobilité.

Plusieurs paramètres ont été sélectionnés afin d'évaluer plus précisément les performances de notre protocole proposé basé sur une fonction multi objective. Comme le montre le Tableau 5.2, le nombre de nœuds pris en compte varie entre 50 et 200 pour pouvoir générer différentes densités de réseau (petite, moyenne et grande) dans une zone de $820m \times 820m$. Les caractéristiques du modèle radio sont similaires à celles d'une interface radio commerciale, la Wave LAN 31 de Lucent. Il s'agit d'une radio à média partagé qui offre une portée radio de transmission de $250m$, une bande passante de canal de $2Mbps$ et un modèle de propagation radio en espace libre. Les métriques de performances sont obtenues en exécutant chaque simulation sous un nombre différent de nœuds de réseau, en moyenne dix simulations. Chaque nœud appartenant au réseau est équipé d'une seule carte d'interface réseau. Le modèle de mobilité utilisé est *Random Way Point*, où tous les nœuds se déplacent aléatoirement avec des vitesses qui varient de $0m/s$ à $.20m/s$ (pour mélanger entre les vitesses élevées et faibles, le pas utilisé est de $5m/s$) : Ce modèle est à la base de plusieurs protocoles de routage, puisqu'il s'agit d'un modèle purement aléatoire. Les valeurs initiales des énergies des nœuds seront choisies aléatoirement entre 30 et 100 joules, pour tester les performances de notre protocole de routage dans le cas non idéal (différents niveaux d'énergie). Le débit de drain $DR_{i,j}(t)$ est choisi aléatoirement entre 1 et 3 afin de prendre en compte le flux multiple des nœuds. La valeur de *Wait_Time_Rep* est fixée à $0,2s$, qui est une valeur de base du protocole AOMDV. Nous considérons CBR (constant bite traffic) comme une source de trafic, où chaque connexion produit quatre paquets par seconde avec une taille de paquet de 512 octets, également IEEE 802.11 comme

type Mac.

Paramètre	Valeur
Simulateur	NS2.35
Protocoles de comparaison	SDERP / OPAOMDV-EE / FT-AORP / EE-LB-AOMDV / AOMDV
Modèle de mobilité	Random Waypoint
Type MAC	IEEE 802.11
Surface de simulation	820 m x 820 m
Durée de simulation	200 s
Nombre de nœuds	50/100/200
Vitesse minimale	5 m/s
Vitesse maximale	20 m/s
Intervalle d'énergie	30 à 100 J
Taille des paquets	512 bits
Wait_Time_Rep	0.2 s

TAB. 5.2 – Paramètres de simulation du protocole SDERP.

Lors de l'évaluation du SDERP et des autres protocoles de comparaison, nous utilisons les mesures suivantes :

1. Taux de livraison de paquets (PDR)

La performance d'un protocole de routage en termes de livraison de paquets de données est mesurée par le *PDR*. C'est le rapport entre la quantité de données reçues par le nœud de destination et la quantité de données transmises par le nœud source :

$$PDR = \frac{\sum NBR_Prs}{\sum NBR_Ps} \times 100s$$

Ici, *NBR_Prs* est le nombre de paquets de données reçus avec succès et *NBR_Ps* est le nombre de paquets de données envoyés.

2. Consommation d'énergie (EC)

Il s'agit de la quantité totale d'énergie consommée par tous les nœuds du réseau pendant la période de simulation :

$$EC = \sum (Ini_ener - Res_ener)$$

où *Ini_ener* est l'énergie initiale du nœud n_i par rapport aux nœuds d'un chemin donné et *Res_ener* est l'énergie résiduelle des nœuds à la fin de la simulation.

3. Overhead (OH)

L'OH est le rapport entre le nombre total de paquets de contrôle générés par tous les nœuds du réseau et le nombre de paquets de données reçus. La bande passante du réseau doit être partagée par les paquets de données et les paquets de routage. Un pourcentage élevé de paquets de routage affecte la durée de vie du réseau en termes d'énergie résiduelle consommée par les nœuds constituant notre réseau et de bande passante utilisée. La formule de calcul du routage *OH* est

$$OH = \frac{NBR_Pts}{NBR_Prs}$$

où NBR_Pts est le nombre de paquets de routage transmis et NBR_Prs est le nombre de paquets de données reçus avec succès.

4. Délai de bout en bout (E2ED)

E2ED (end to end delay) est la moyenne des temps nécessaires pour acheminer les paquets de données d'un nœud source vers un nœud de destination. Le temps de transmission d'un paquet de données comprend les éléments suivants : le temps de découverte, le temps de mise en mémoire tampon, le temps d'attente de la file d'attente et le délai de transmission. $E2ED$ est calculé comme suit :

$$E2ED = \frac{\sum_{i=0}^{NBR_Prs} (Tmp_r_i - Tmp_t_i)}{NBR_Prs}$$

Ici, Tmp_r_i est le temps de réception du paquet de données i par le nœud de destination et Tmp_t_i est le temps d'envoi du même paquet par le nœud source.

Résultats de simulation et discussion

1. Taux de livraison de paquets (PDR)

La Figure 5.4 présente l'évaluation des performances de SDERP, FT-AORP, EE-LB-AOMDV, OPAOMDV-EE et AOMDV en fonction de la valeur du taux de livraison des paquets, avec trois types de scénarios : 50, 100 et 200 nœuds, en fonction de différentes vitesses de déplacement. La métrique PDR est choisie pour démontrer les performances de notre protocole en termes de livraison de paquets de données, ainsi que sa fiabilité et sa tolérance aux pannes. Dans les trois scénarios, notre SDERP surpasse les autres protocoles.

En raison de la variation de la mobilité sur quatre plages, nous pouvons observer que le taux du PDR diminue à mesure que la vitesse des nœuds augmente, car les nœuds se déplacent plus rapidement et sortent rapidement de la plage de transmission, ce qui entraîne des pannes de liaison.

Dans le premier scénario (a), avec un faible nombre de nœuds, les trois protocoles SDERP, FT-AORP et EE-LB-AOMDV ont réussi à fournir un taux de plus de 85% par rapport aux deux autres protocoles. Notre protocole dépasse celui du FT-AORP de 1% à 3% pour toutes les plages de vitesse et celui du EE-LB-AOMDV de 4% à 5% pour les trois plages de vitesse : 0–5, 5–10 et 10–15 m/s, et de 2% lorsque la vitesse augmente. Pour les deux autres protocoles, OPAOMDV-EE et AOMDV, SDERP réalise une amélioration de 5% à 16% pour tous les scénarios de mobilité. Pour les scénarios de 100 nœuds, SDERP surpasse le FT-AORP avec un taux de 1% à 3% et celui du EE-LB-AOMDV de 3% à 7%. Pour OPAOMDV et AOMDV, le taux de réussite de notre solution a augmenté d'environ 7% à 13%. Pour toutes les variations de vitesse dans le scénario (c), SDERP surpasse FT-AORP et EE-LB AOMDV avec un taux de 2% à 6% et OPAOMDV-EE et AOMDV avec un taux de 3% à 7%. Bien que FT-AORP utilise plusieurs métriques de routage pertinentes où la mobilité et la qualité du signal sont calculées par rapport aux changements du nombre de voisins, c'est une mauvaise décision, et comme les trois autres protocoles (EE-LB-AOMDV, OPAOMDV-EE et AOMDV) ne contiennent ni une métrique de mobilité ni une métrique de stabilité, le succès dans le PDR de notre solution est dû à l'efficacité du processus d'évolution différentielle basé sur l'énergie et la stabilité.

Notre fonction de fitness comprend une métrique de stabilité qui est calculée en fonction de la mobilité des nœuds constituant le chemin ; cette stabilité du lien est influencée par la vitesse des nœuds du réseau sans fil mobile et constitue une bonne décision pour gérer les cas de vitesse élevée. Notre protocole sélectionne le chemin le plus stable en fonction des contraintes de stabilité

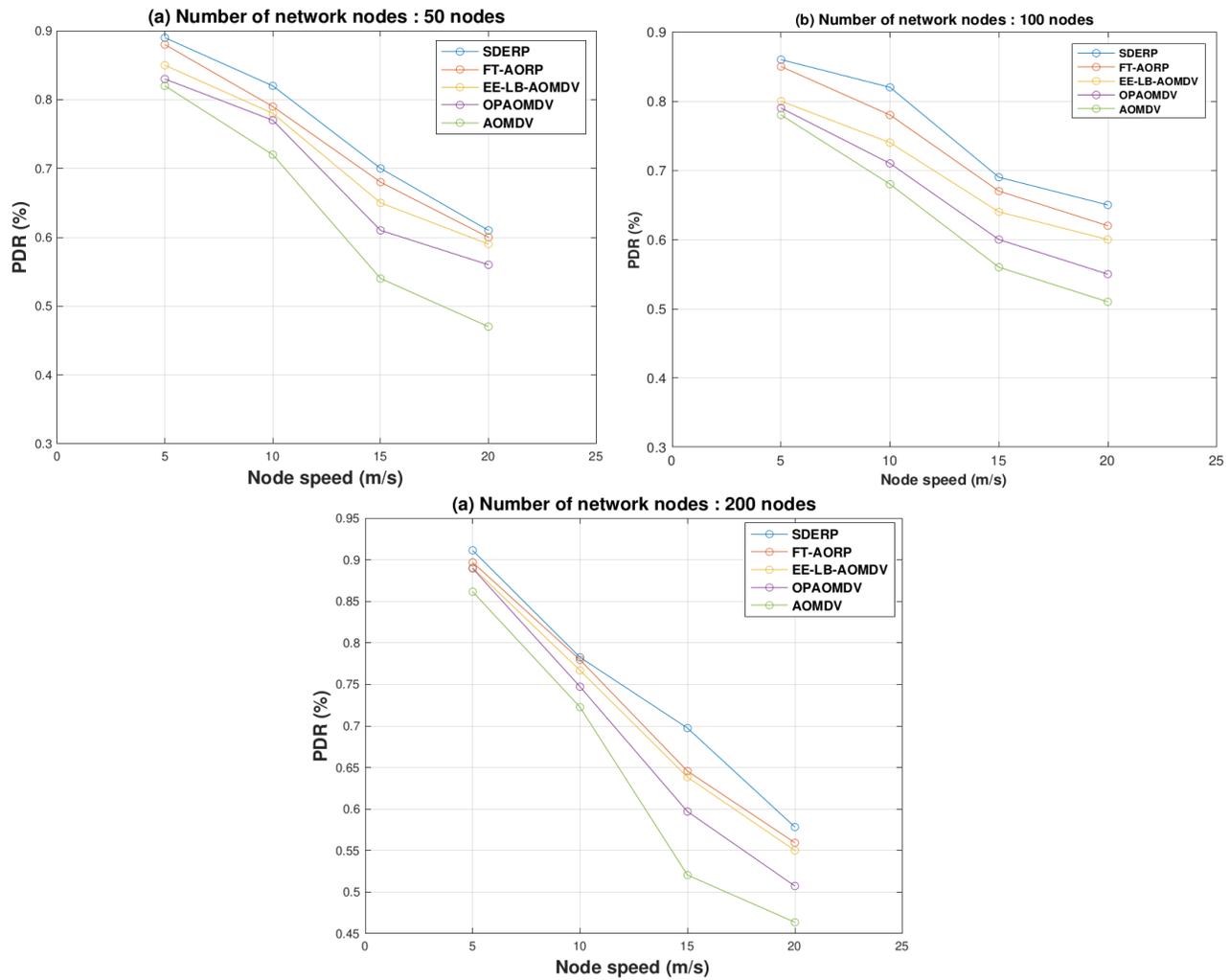


FIG. 5.4 – Le PDR vs La vitesse des nœuds.

et d'énergie afin d'assurer une transmission de données efficace (réduction des défaillances de liaison).

2. Consommation d'énergie (EC)

La Figure 5.5 traite de la métrique EC, avec trois scénarios pour lesquels quatre intervalles de vitesses de nœuds sont définis.

Dans les trois scénarios, nous observons que lorsque la vitesse augmente, l'EC augmente. Cela est dû au fait que la topologie du réseau change, ce qui nécessite des retransmissions fréquentes de paquets de données. Pour un réseau de 50 nœuds, dans les quatre variantes d'intervalles de vitesse, nous concluons que SDERP est plus efficace et conserve plus d'énergie, avec un taux d'amélioration énergétique de 2% à 8%, que tous les protocoles. Pour le scénario (b), comparé à FT-AORP, EE-LB-AOMDV et OPAOMDV-EE, SDERP offre des améliorations comprises entre 21% et 30% et entre 23% et 39% par rapport à AOMDV. Lorsque le nombre de nœuds atteint 200, notre solution offre des améliorations par rapport à FT-AORP, EE-LB-AOMDV et OPAOMDV-EE comprises entre 7% et 14% et par rapport à AOMDV, entre 9% et 18%.

Notre protocole conserve plus d'énergie que tous les protocoles comparés, car il sélectionne le chemin optimal en fonction de l'énergie et de la stabilité, ce qui signifie une durée de vie du chemin plus longue, moins de perte de paquets et un nombre minimal de processus de redécou-

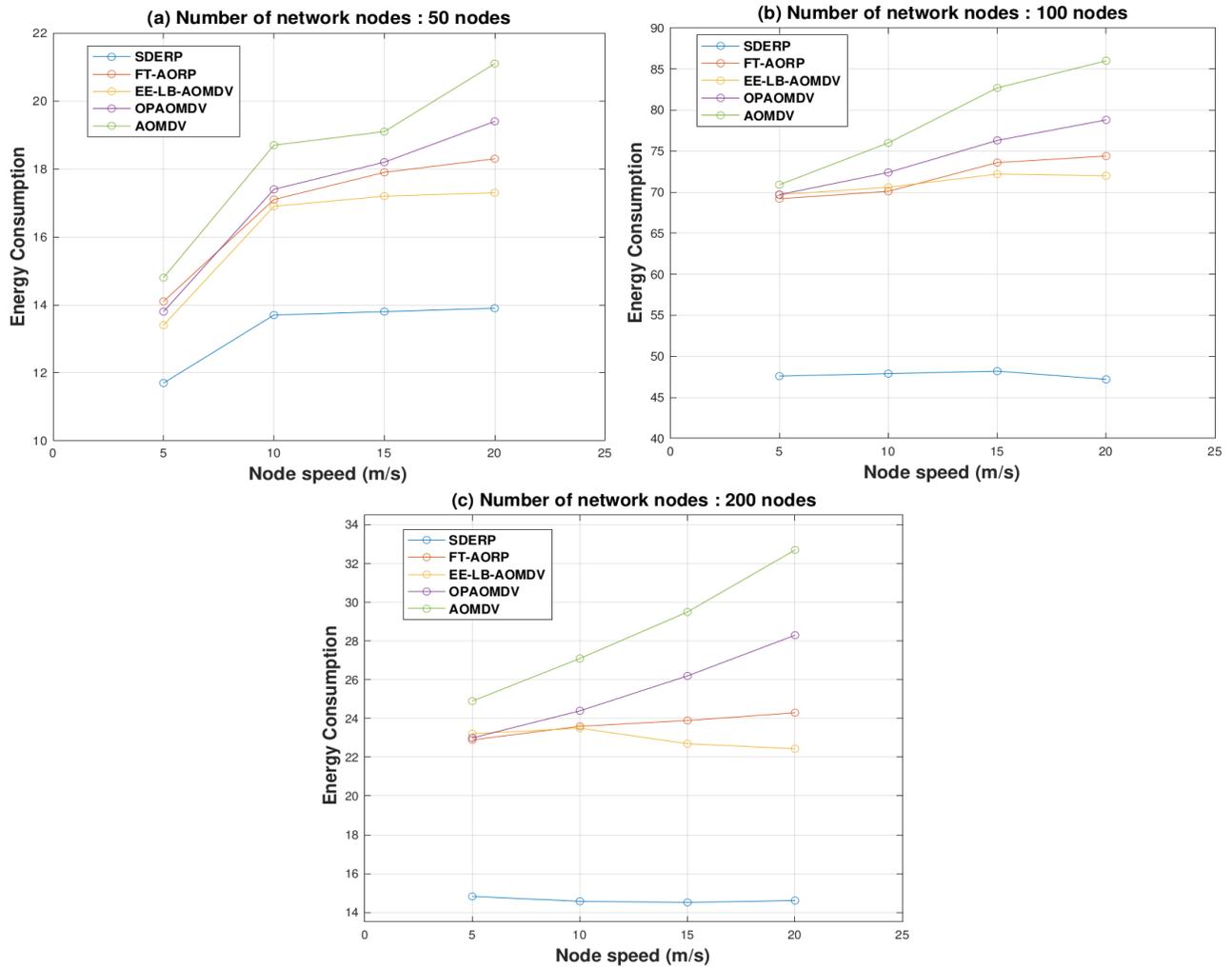


FIG. 5.5 – La consommation d'énergie vs La vitesse des nœuds.

verte, réduisant ainsi considérablement le paquet de contrôle (où chaque opération d'envoi et de réception de paquet de contrôle dans l'ensemble du réseau consomme de l'énergie). En revanche, FT-AORP nécessite plus d'énergie, car il utilise un mécanisme de duplication de tous les paquets de données transmis.

3. Overhead (OH)

Une troisième mesure de performance est le taux de contrôle OH. Cette mesure dépend de l'algorithme proposé, de la topologie du réseau, de la taille du réseau en termes de nombre de nœuds et de leur mobilité.

La Figure 5.6 présente le taux de contrôle OH de tous les protocoles selon trois scénarios. Nous remarquons que ce taux est inférieur pour SDERP par rapport aux autres. Le taux de contrôle OH de notre solution est de 2 à 16% inférieur à celui de FT-AORP, de 4 à 24% inférieur à celui de EE-LB-AOMDV, de 4 à 26% inférieur à celui de OPAOMDV-EE et de 4 à 33% inférieur à celui de AOMDV.

Comme notre protocole évite les liens instables en choisissant les nouveaux chemins en fonction de la meilleure valeur de fitness, cela réduit considérablement le nombre de chemins qui génèrent d'énormes paquets de contrôle pour rétablir la transmission. En effet, il génère moins de paquets de contrôle par rapport au protocole FT-AORP, qui prend une mauvaise décision lors du calcul

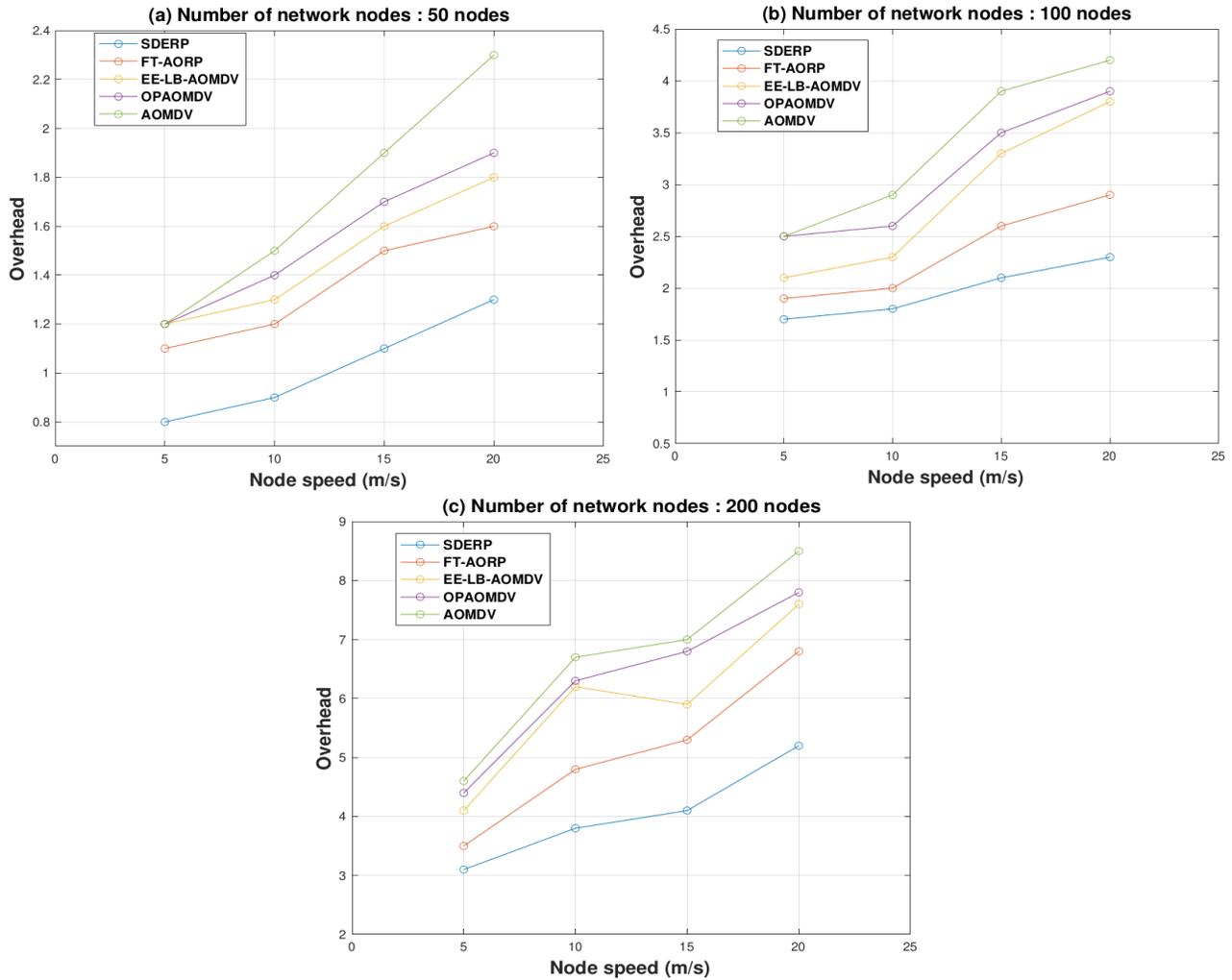


FIG. 5.6 – Overhead vs La vitesse des nœuds.

des valeurs de mobilité et de qualité du signal, et par rapport aux protocoles EE-LB-AOMDV, OPAOMDV-EE et AOMDV, qui ignorent les paramètres de stabilité et souffrent d'énormes paquets de contrôle en raison de leurs plus grandes défaillances de liaison (surtout lorsque la vitesse augmente).

4. Délai de bout en bout (E2ED)

La Figure 5.7 traite de la métrique E2ED, avec trois scénarios dans lesquels quatre intervalles de vitesses de nœuds sont définis.

Les quatre protocoles de routage SDERP, FT-AORP, EE-LB-AOMDV et OPAOMDV-EE utilisent des critères pour calculer la fonction de fitness afin de choisir les meilleurs chemins, ce qui augmente le temps de traitement par rapport au protocole AOMDV de base. Dans tous les scénarios, l'E2ED augmente à mesure que le nombre de nœuds augmente, car les chemins de transmission de données sont plus longs (plusieurs nœuds sont impliqués). Cependant, SDERP garantit un E2ED inférieur à celui du protocole FT-AORP, de 0,5% à 3%, par rapport à EE-LB-AOMDV et OPAOMDV-EE, il est inférieur de 1% à 5%. Mais il est supérieur à AOMDV de 2% à 11%. Notre solution est efficace car elle repose sur le transfert de paquets de données sur de nouveaux chemins stables, ce qui offre de meilleures performances réseau malgré le temps perdu lors des phases de mutation et de croisement de la méthode d'évolution différentielle bio-inspirée.

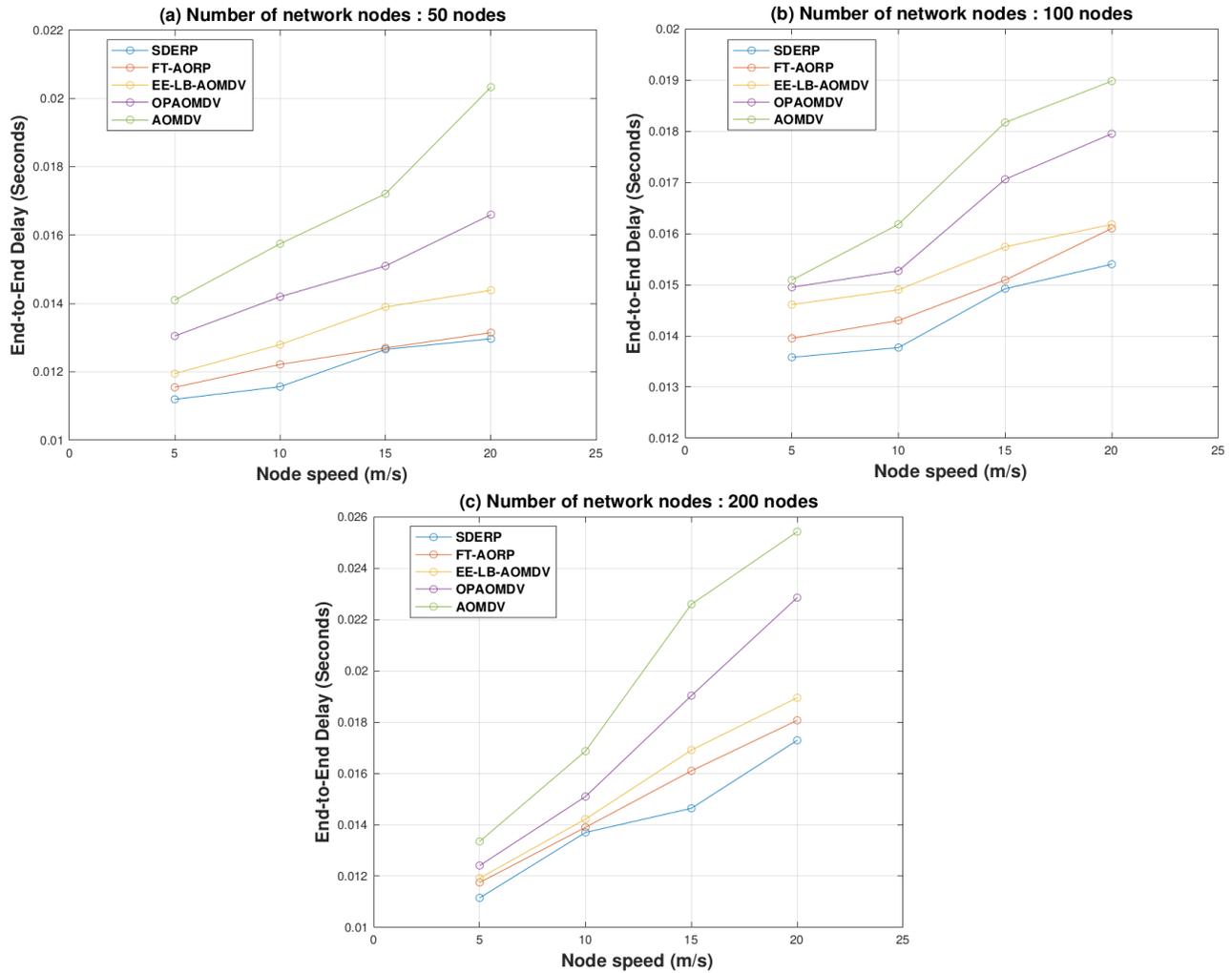


FIG. 5.7 – Le délai de bout en bout vs La vitesse des nœuds.

En revanche, FT-AORP prend de mauvaises décisions lors du calcul de la fonction de fitness, car les paramètres de mobilité et de signal sont calculés par rapport au nombre de voisins. EE-LB-AOMDV est peu performant par rapport au protocole OPAOMDV-EE, car il inclut un critère de temps aller-retour lors du choix des meilleurs chemins.

5.3 Le protocole de routage multi-chemins ES-RPDE

Nous avons suggéré une deuxième solution de routage similaire à SDERP, appelée ES-RPDE [25] (Protocole de routage à sensibilité énergétique et à liaison stable basé sur l'évolution différentielle pour les réseaux MANETs). ES-RPDE adopte les mêmes procédures de recherche et de choix du protocole SDERP, qui repose sur deux contraintes principales : la stabilité des liaisons et l'efficacité énergétique des nœuds. Nous avons maintenu les mêmes fonctions : celle du coût énergétique qui est déterminée en se basant sur l'énergie restante du nœud et le taux de consommation d'épuisement et celle de la stabilité des liaisons qui est calculée selon le coefficient de variation basé sur l'écart absolu moyen. L'implémentation de la méthode bio-inspirée évolution différentielle est initiée au milieu du processus de découverte des chemins, exactement au niveau du nœud destination. Une fois terminée, la destination transmet l'ensemble des nouveaux chemins valides issus après L'ED

avec leurs valeurs de fitness au nœud source. Ce dernier sera chargé de choisir le meilleur chemin optimal pour transmettre les données.

5.3.1 Présentation du protocole de routage ES-RPDE

Les étapes mentionnées ci-dessous de notre protocole de routage multi-chemins à base d'évolution différentielle ES-RPDE conçu pour les réseaux ad hoc sont illustrées dans la figure 5.8.

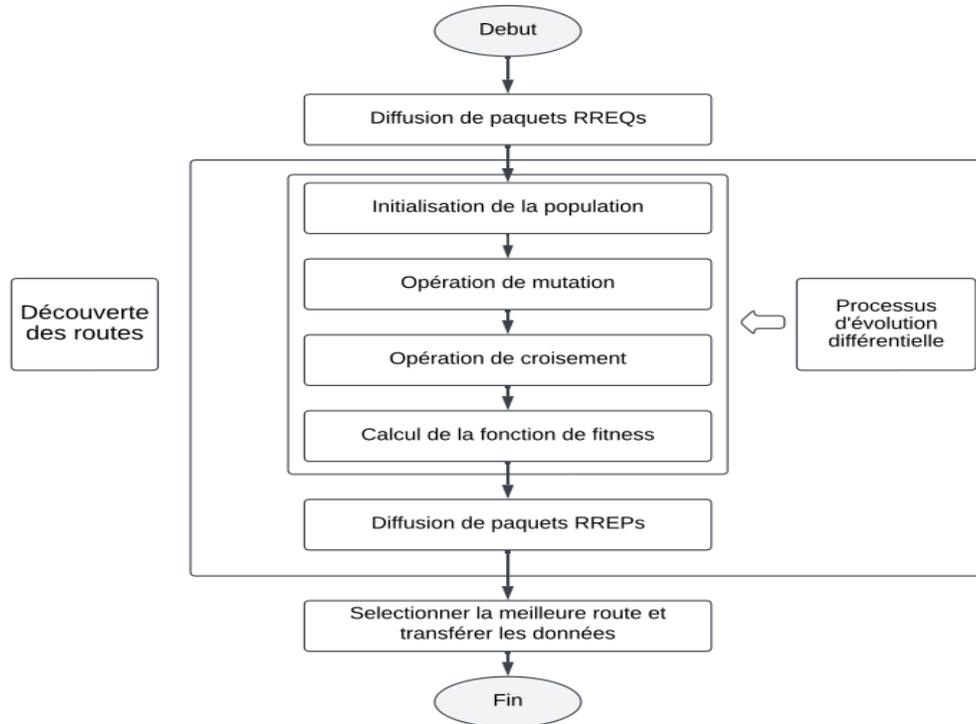


FIG. 5.8 – Étapes du protocole de routage ES-RPDE.

Processus de découverte des chemins

1. Diffusion de paquets RREQs

Notre protocole ES-RPDE s'inspire des étapes d'implémentation du protocole de base AOMDV [15]. Pour découvrir l'ensemble des chemins stables entre le nœud source et le nœud de destination, notre solution utilise les messages de contrôle suivants : Route Request RREQ et Route Reply RREP pendant la découverte, et Route Error RERR et Hello pour la maintenance. Ces messages de contrôle ont été renforcés par d'autres champs supplémentaires, à savoir l'énergie résiduelle du nœud et ces coordonnées. Chaque nœud possède une table de routage. Pour chaque chemin de la liste des chemins enregistrés, une nouvelle valeur de la fonction fitness est saisie.

Au début de chaque transmission de paquets de données, le nœud source va vérifier sa table de routage. Si elle contient un chemin valide vers le nœud de destination, il transmet les paquets en file d'attente ; sinon, il déclenche le processus de découverte des chemins en diffusant un paquet RREQ à tous ses nœuds voisins. Le nœud source initialise un temporisateur RREQ Timer, pour détecter si la destination est inaccessible. Lorsque chaque nœud intermédiaire reçoit un paquet RREQ, il compare le numéro de séquence du paquet avec celui enregistré dans sa table de routage

et s'assure que le nombre de sauts du paquet n'est pas supérieur au nombre de sauts annoncé. Si ces deux conditions sont remplies, le nœud envoie le paquet à ses voisins ; sinon, il enregistre le nouveau chemin inverse et son numéro de séquence le plus élevé dans sa table.

Au niveau du nœud de destination, nous avons défini un timer appelé RREQ_Timer qui se déclenche à l'arrivée du premier paquet RREQ. Ce timer est réglé pour interrompre l'envoi des paquets de type RREPs et attendre que d'autres paquets RREQs soient collectés.

2. Processus d'évolution différentielle

Le principe d'évolution différentielle du protocole de routage multi-chemins ES-RPDE est le même que celui du protocole SDERP. Cependant, son exécution est au niveau du nœud de destination. Après la fin de la collection des chemins depuis le nœud source vers le nœud destination et lorsque le timer RREQ_Timer se termine, la destination déclenche le processus d'évolution différentielle. Une fois terminé, la destination sauvegarde les nouveaux chemins issus et calcule leur fonction de fitness selon les contraintes de stabilité des liens et l'énergie des nœuds.

3. Diffusion de paquets RREPs

Le nœud destination enregistre les nouveaux chemins avec leur valeur de fitness dans sa table de routage du, puis il commence à envoyer des paquets de type RREPs vers la source avec les nouvelles informations (voir Figure 5.9).

SRC_ID	DST_ID	N°_SEQ_DST	NBR_sauts	Durée_de_vie	Liste_nœuds	$fp_i(t)$
--------	--------	------------	-----------	--------------	-------------	-----------

FIG. 5.9 – Structure du nouveau paquet RREP.

Processus de transmission de données

Pour contrôler la liaison entre un nœud et ses voisins, un message de type Hello est envoyé de manière régulière. Nous avons utilisé ce message pour collecter la distance (symbolisée par D_{ij}) entre le nœud et ses voisins. Les distances sauvegardées serviront à évaluer la stabilité des liaisons (voir la Figure 5.10).

DST_ID	N°_SEQ_DST	NBR_sauts	Délai_d'expiration	d_{ij}
--------	------------	-----------	--------------------	----------

FIG. 5.10 – Structure de la table de voisinage du protocole ES-RPDE.

Lorsque le nœud source reçoit le premier paquet de type RREP, il commence directement la transmission des paquets de données en file d'attente. À chaque fois qu'un message de type RREP arrive, le nœud source met à jour sa table de routage en insérant ce nouveau chemin avec sa valeur de fitness, puis il sélectionne le nouveau meilleur chemin qui a la meilleure valeur de fitness.

Processus de maintenance des chemins

Le processus de maintenance des chemins est lancé en envoyant régulièrement des messages de type HELLO à chaque période de temps aux nœuds enregistrés dans la liste des voisins. Si trois messages consécutifs envoyés par un voisin ne sont pas reçus, le lien sera rompu. Lorsqu'un nœud détecte une défaillance de chemin sur son saut suivant, il le supprime de sa table de routage et

gène un message d'erreur de chemin (RERR) à la source. Lorsque le nœud source reçoit le RERR, il supprime tous les chemins qui ont des nœuds inaccessibles et choisira un autre chemin alternatif vers la destination ; sinon, il déclenche un nouveau processus de découverte.

5.3.2 Évaluation des performances du protocole ES-RPDE

Dans cette section, nous abordons les résultats issus de la simulation de notre protocole de routage multi-chemins ES-RPDE conçu pour un réseau ad hoc. Pour évaluer et démontrer l'efficacité de notre protocole, nous l'avons mis en comparaison avec les protocoles OPAOMDV-EE [69] et AOMDV [54], en utilisant le modèle de mobilité RWP.

Trois critères de performance ont été sélectionnés :

- **Taux de livraison des paquets (PDR)** : c'est le rapport entre la quantité de données reçues et la quantité de données transmises, respectivement, par les nœuds source et destination.
- **La consommation d'énergie (EC)** : c'est l'énergie totale consommée par tous les nœuds pendant la période de simulation.
- **Le flux de contrôle (Overhead)** : c'est le rapport entre le total des paquets de contrôle générés par tous les nœuds et le total des paquets de données reçus.

Environnement et paramètres de simulation

Différents paramètres ont été choisis pour évaluer les performances de notre solution (voir Tableau 5.3). Le protocole de routage ES-RPDE est destiné aux réseaux MANETs, où tous les nœuds sont mobiles. Le nombre de nœuds choisi est compris entre 50 et 200, répartis sur une surface de $820m \times 820m$. Nous avons utilisé Random Way Point comme modèle de mobilité où tous les nœuds du réseau se déplacent de manière aléatoire avec quatre intervalles de vitesse entre $0m/s$ et $20m/s$ (le pas utilisé est de $5m/s$). Nous avons considéré qu'au début de la simulation, la quantité d'énergie des nœuds variait entre 30 et $100joules$, et cela en relation avec la nature de notre réseau. Comme nous avons une population réduite de chemins découverts, nous avons opté pour une mutation totale et un croisement lors du processus d'évolution différentielle. Nous avons introduit pour la fonction de fitness un coefficient α . Le choix du coefficient influence les résultats obtenus ; $\alpha = 0,5$ a été choisi pour éviter de privilégier l'un des paramètres de la fonction de fitness par rapport à l'autre.

Résultats de simulation et discussion

1. Taux de livraison des paquets

La Figure 5.11 illustre le taux de livraison des paquets avec trois scénarios : 50, 100 et 200 nœuds. Pour chaque scénario, les nœuds se déplacent à des vitesses différentes. Nous observons dans tous les scénarios que le taux de livraison des paquets se détériore avec l'augmentation de la vitesse, ce qui est attendu dans les réseaux ad hoc en raison de la fréquence accrue des ruptures de liens. Cependant, parmi les trois protocoles comparés (ES-RPDE, OPAOMDV-EE et AOMDV), ES-RPDE se distingue par les meilleures performances en termes de PDR. Cette supériorité s'explique par son mécanisme d'optimisation basé sur l'algorithme d'évolution différentielle, qui permet de sélectionner des chemins plus stables en tenant compte à la fois de l'énergie résiduelle des nœuds et de la stabilité des liens. En conséquence, ES-RPDE prend des décisions plus adaptées aux environnements à haute mobilité, garantissant une livraison plus efficace des paquets par rapport à OPAOMDV-EE et AOMDV, qui ne disposent pas d'une stratégie aussi avancée pour la gestion dynamique des chemins.

2. Consommation d'énergie

Paramètre	Valeur
Simulateur	NS2.35
Modèle de mobilité	Random Waypoint
Type MAC	IEEE 802.11
Type de trafic	IEEE <i>CBR</i>
Surface de simulation	820 m x 820 m
Durée de simulation	200 s
Nombre de nœuds	50/100/200
vitesse	5 à 20 m/s
Intervalle d'énergie	30 à 100 Joules
Taille des paquets	512 bits
P_m	1.0 s
P_c	1.0 s
α	0.5 s

TAB. 5.3 – Paramètres de simulation du protocole ES-RPDE.

La Figure 5.12 illustre la consommation énergétique des trois protocoles étudiés en fonction du niveau de mobilité des nœuds. Une tendance générale se dégage : plus la mobilité des nœuds est élevée, plus la consommation énergétique du réseau augmente. Cette hausse s'explique principalement par la fréquence accrue des ruptures de liens, qui entraînent une augmentation du nombre de découvertes des chemins et une transmission plus importante de paquets de contrôle, générant ainsi une surcharge énergétique.

Parmi les trois protocoles analysés (ES-RPDE, OPAOMDV-EE et AOMDV), ES-RPDE se distingue par une consommation énergétique nettement inférieure. Cette efficacité énergétique repose sur plusieurs mécanismes d'optimisation tels que la sélection intelligente des chemins présentant une longue durée de vie, la diminution du nombre de paquets de contrôle grâce à son approche basée sur l'algorithme d'évolution différentielle et la prise de décision basée sur l'énergie et la stabilité qui permet au protocole ES-RPDE d'éviter l'exploitation excessivement des nœuds à faible énergie, équilibrant ainsi la charge du réseau et prolongeant la durée de vie globale du système.

En comparaison, AOMDV, bien qu'étant un protocole multi-chemins efficace, ne prend pas en compte l'état énergétique des nœuds, ce qui entraîne une surcharge rapide des nœuds les plus sollicités et une consommation accrue. OPAOMDV-EE, de son côté, introduit une optimisation énergétique mais reste limité dans sa gestion de la stabilité des chemins, ce qui ne permet pas d'atteindre le même niveau de performance que le protocole ES-RPDE.

Notre protocole ES-RPDE représente la solution la plus économe en énergie, car elle parvient à minimiser les coûts liés aux reconstructions des nouveaux chemins et à optimiser l'utilisation des ressources du réseau. Son approche fondée sur l'énergie et la stabilité des liens en fait un choix particulièrement adapté aux environnements à haute mobilité, où la gestion efficace de l'énergie est un facteur clé de performance.

3. Overhead

La Figure 5.13 illustre l'overhead de contrôle des trois protocoles étudiés à travers différents scénarios où la vitesse des nœuds varie. Les résultats montrent que l'overhead reste un facteur critique dans la performance globale du réseau, car il influence directement la consommation des ressources et la charge de communication.

Parmi les protocoles comparés, ES-RPDE se distingue par une réduction significative du trafic de

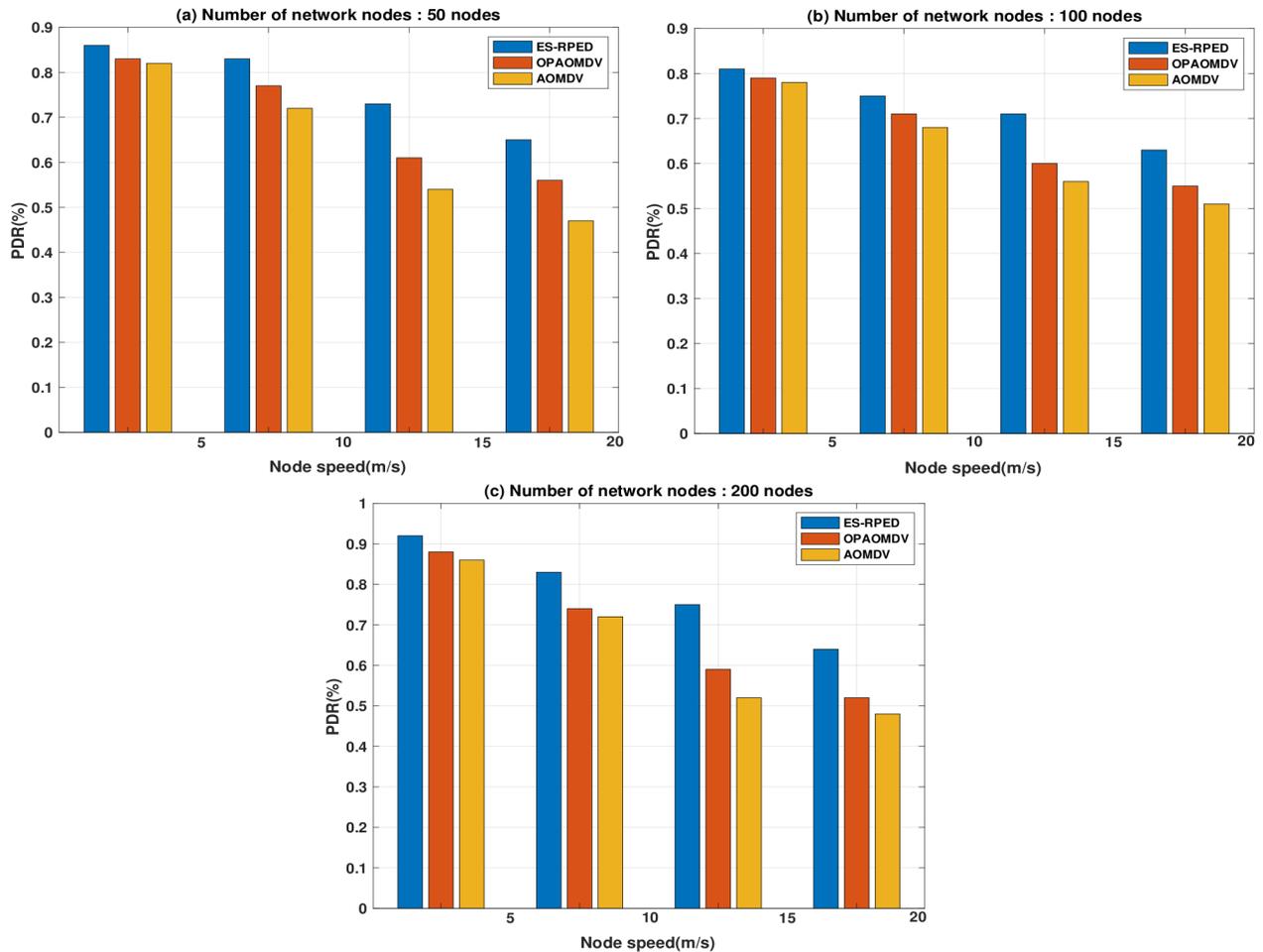


FIG. 5.11 – Le PDR vs La vitesse des nœuds.

contrôle par rapport à OPAOMDV-EE et AOMDV. Cette optimisation s'explique par deux facteurs. Premièrement, la gestion intelligente des chemins en évitant systématiquement les chemins instables par la sélection des nouveaux chemins alternatifs les plus fiables par l'algorithme DE, ce qui réduit considérablement la nécessité de redécouvrir de nouveaux chemins. Deuxièmement, la prise de décision basée sur la valeur de fitness, grâce à l'algorithme d'évolution différentielle, ES-RPDE évalue les chemins potentiels en fonction de deux critères essentiels : l'énergie résiduelle des nœuds et la stabilité des liens. Cette méthodologie permet de privilégier des chemins durables et d'éviter les reconstructions fréquentes, qui sont une source majeure d'overhead.

Les deux protocoles AOMDV et OPAOMDV-EE génèrent un overhead plus important, car le premier bien qu'étant un protocole multi-chemins efficace, il ne dispose pas de mécanisme avancé pour évaluer la stabilité des chemins, ce qui entraîne des découvertes des chemins plus fréquentes et une charge de contrôle plus élevée. OPAOMDV-EE, malgré son optimisation énergétique, ne parvient pas à égaler ES-RPDE en termes de réduction de l'overhead, car il ne prend pas en compte l'ensemble des paramètres de stabilité et d'énergie lors du choix des chemins. Notre solution ES-RPDE offre une gestion plus efficace du trafic de contrôle, en limitant le nombre de paquets de signalisation nécessaires au maintien des communications. Cette approche contribue à améliorer la scalabilité et la fluidité des transmissions, en particulier dans des environnements où la mobilité des nœuds est élevée.

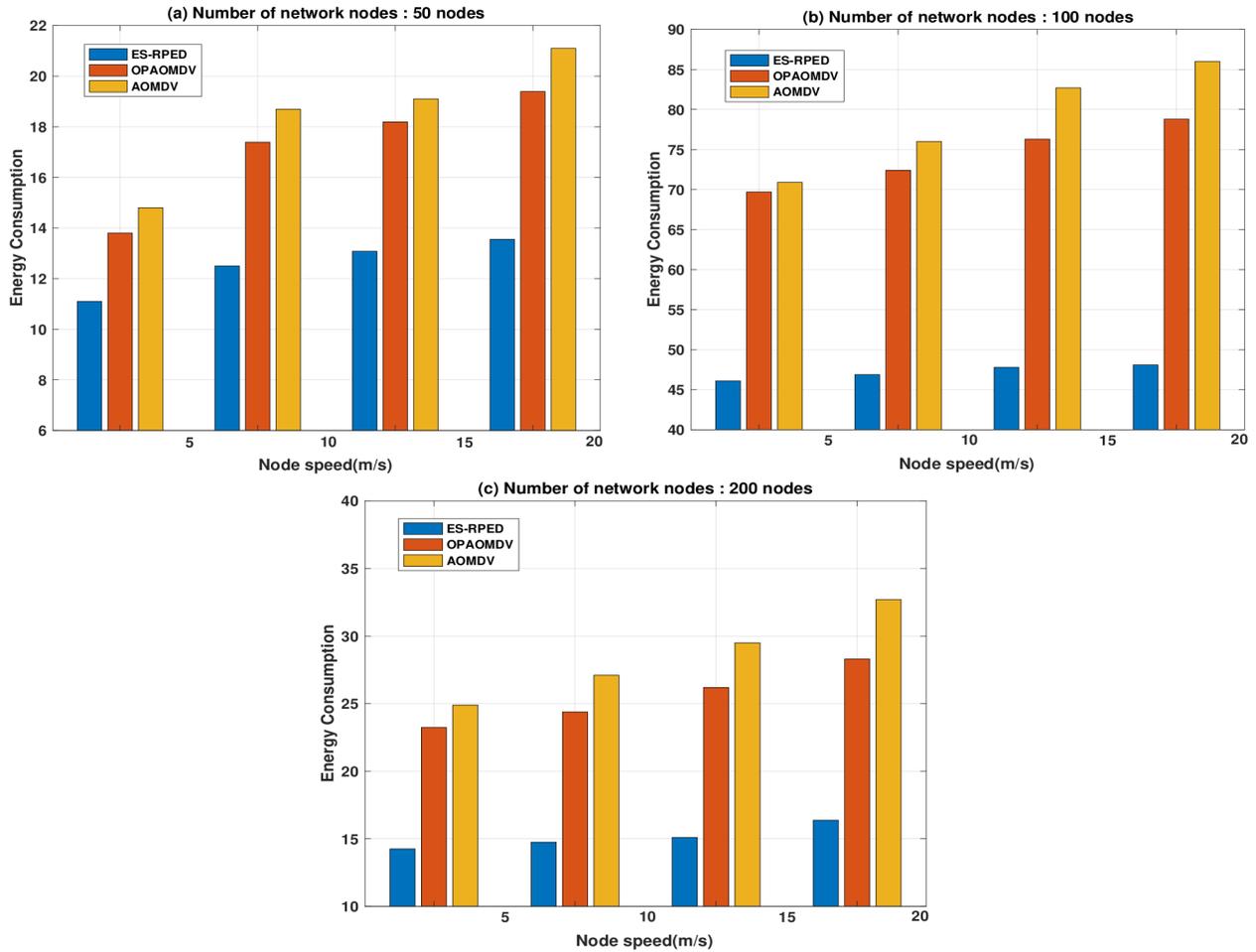


FIG. 5.12 – La consommation d'énergie vs La vitesse des nœuds.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté nos deux protocoles de routage multi-chemins qui se basent sur une méthode bio-inspirée dite évolution différentielle et sur l'intégration de deux contraintes d'énergie et de stabilité. Nous avons opté pour la contrainte énergétique dans le but d'écartier les nœuds présentant une faible énergie susceptibles de quitter le réseau en raison de leur déficit énergétique; cela engendre des interruptions et diminue la longévité du réseau sur le long terme. En outre, la stabilité nous donne la possibilité d'évaluer la longévité d'un chemin selon la mobilité des nœuds.

Le protocole SDERP est une combinaison d'un protocole de routage multi-chemins réactif avec la méthode d'évolution différentielle. Cette méthode bio-inspirée sera exécutée une fois la découverte des chemins terminée. Le nœud source prend la charge de sélectionner le meilleur chemin selon une fusion de deux contraintes d'énergie et de stabilité pour garantir la fiabilité et optimiser l'efficacité du réseau. L'analyse comparative de ce protocole avec OPAOMDV-EE, FT-AORP, EE-LB-AOMDV et AOMDV révèle que notre solution proposée préserve l'énergie des nœuds, ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

On a proposé une deuxième solution de routage appelée ES-RPDE, qui suit la même méthodologie que le protocole SDERP, mais l'appel de la méthode bio-inspirée ED se fait au milieu de la découverte des chemins, plus précisément au niveau du nœud destination. Une fois terminé, le

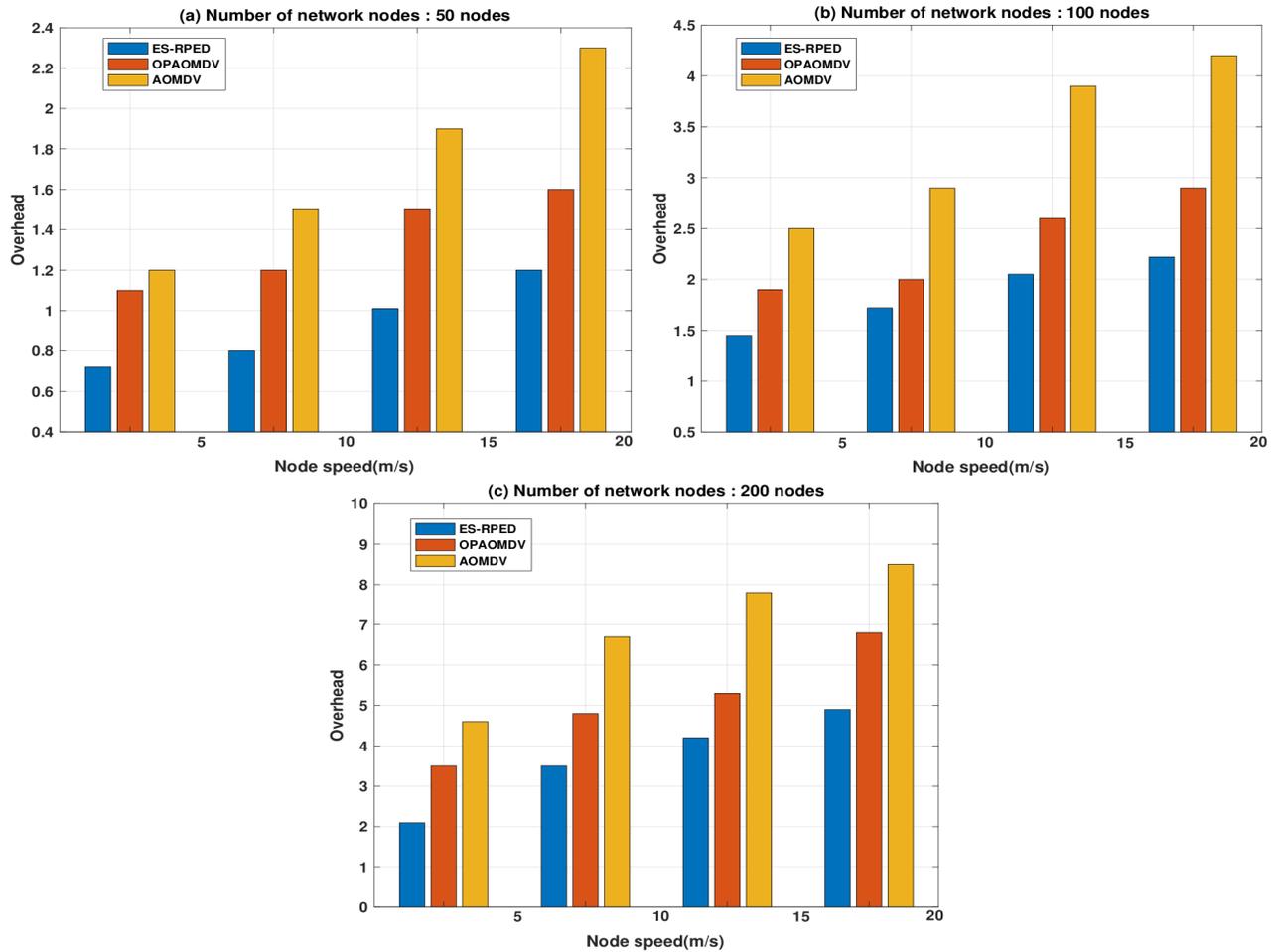


FIG. 5.13 – Overhead vs La vitesse des nœuds.

nœud source sélectionnera le meilleur chemin en fonction des deux contraintes : énergie des nœuds et stabilité des liaisons. Les performances de notre protocole ES-RPDE se révèlent meilleures que celles D'OPAOMDV-EE et D'AOMDV dans le modèle RWP. Toutefois, le protocole ES-RPDE augmente considérablement le taux de paquets reçus et réduit le taux de messages de contrôle dans les réseaux MANETs.

Chapitre 6

Protocole de routage multi-chemins SE-RPCS

Contents

6.1	Introduction	123
6.2	Les réseaux FANETs	124
6.2.1	Les drones	124
6.2.2	Architectures de communication d'un réseau FANET	127
6.3	Le routage dans les réseaux FANETs	129
6.4	Présentation du protocole de routage SE-RPCS	130
6.4.1	Processus de découverte des chemins	130
6.4.2	Processus de recherche du coucou	132
6.5	Évaluation des performances du protocole SE-RPCS	136
6.5.1	Environnement et paramètres de simulation	136
6.5.2	Résultats de simulation et discussion	136
6.6	Conclusion	138

Référence :

1. Mekkaoui Abdelkader, Smail Omar, et Rebbah Mohammed : Energy Aware and Stability Multipath Routing Protocol Based on the Cuckoo Search Algorithm for FANETs. In : International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems. Springer Nature Switzerland, 2024. p. 493-503.

6.1 Introduction

Les réseaux aériens ad hoc (FANETs) jouent un rôle crucial dans les applications contemporaines (ou modernes) qui exigent une flexibilité considérable, un déploiement instantané et une communication en temps réel dans des environnements dynamiques, tels que l'intervention en cas de catastrophe, la surveillance écologique, les missions de recherche et sauvetage, l'agriculture et les opérations militaires tactiques. Dans ce contexte, les drones (UAVs dit aussi les véhicules aériens sans pilote) mettent en place des réseaux décentralisés afin d'échanger des données entre les nœuds

et de garantir une communication de bout à bout sur des territoires étendus et fréquemment difficilement accessibles. Toutefois, l'énergie et la mobilité élevée des nœuds UAV avec des topologies changeantes représentent un défi pour les FANETs. Les réseaux FANETs sont confrontés à plusieurs difficultés, notamment des pannes de liaison fréquentes, une latence et une consommation d'énergie inefficace. Ainsi, une solution efficace qui fait appel à une méthode bio-inspirée et qui permet l'adaptabilité dans un cadre d'optimisation multi-objectifs pour assurer une meilleure stabilité et une moindre consommation d'énergie entre les fonctionnalités de routage est nécessaire. Dans ce chapitre, nous introduirons un aperçu général sur les réseaux FANETs (définition, architecture, domaines d'application, technologies de communication), après nous présenterons certains protocoles de routage mis en œuvre pour traiter la question du routage dans ce genre de réseau, qui font appel à des techniques méta-heuristiques inspirées de la nature. Nous introduirons ensuite notre première contribution, qui vise à élaborer un nouveau protocole de routage multi-chemins à lien disjoint basé sur la méthode bio-inspirée la recherche coucou. Ce dernier prend en compte les contraintes de stabilité et d'énergie pour sélectionner le chemin optimal pour le transfert des données. En conclusion, nous allons décrire les résultats tirés de la simulation de notre protocole de routage et des autres protocoles que nous avons analysés.

6.2 Les réseaux FANETs

6.2.1 Les drones

Définition d'un drone

Les drones, également appelés véhicules aériens sans pilote, sont des aéronefs qui sont contrôlés soit par des télécommandes, soit par des logiciels embarqués. Dans le passé, les drones étaient surtout déployés chez les militaires pour des vérifications aériennes. Ces derniers temps, On a constaté un accroissement de l'enthousiasme pour l'emploi des drones dans les applications civiles et industrielles du fait de leur évolution des technologies de production et de leur réduction de prix, les rendant plus facilement accessibles au grand public. Actuellement, les drones sont utilisés dans divers secteurs tels que l'observation aérienne, le cinéma, la distribution de colis, les télécommunications et la photographie [152].

Pricewaterhouse Coopers (PwC) a déclaré en juin 2016 que le marché des drones était évalué à plus de 127 milliards de dollars, avec une prédominance de l'infrastructure civile d'une valeur de 45 milliards de dollars. De plus, on prévoit la création de plus de 100 000 emplois supplémentaires dans le secteur des drones d'ici 2025 [153]. De ce fait, les drones sont désormais une technologie prometteuse susceptible d'ouvrir de nombreuses perspectives commerciales dans l'avenir.

Les drones peuvent être classés en deux grandes catégories : les drones à voilure fixe et ceux à voilure tournante (multirotors), comme illustré par la Figure 6.1 . Le choix du type de drone est un facteur clé pour garantir l'efficacité de la mission. Les drones à voilure fixe sont particulièrement adaptés aux missions de surveillance de longue portée ou de longue durée, mais ils présentent une limitation majeure : l'incapacité à maintenir un vol stationnaire. À l'inverse, les drones à voilure tournante offrent la capacité de décoller et d'atterrir verticalement, ainsi que de rester immobiles en vol, ce qui explique l'intérêt croissant qu'ils suscitent auprès des chercheurs et des industriels [154].

Grâce à leurs caractéristiques uniques, telles qu'une excellente mobilité en trois dimensions (3D), un fonctionnement autonome et un déploiement à la demande, les drones représentent une solution prometteuse pour de nombreuses applications. Ils sont utilisés dans divers domaines, notamment les applications civiles, la sécurité publique, l'industrie, l'Internet des objets (IoT) et la surveillance. Dans ces contextes, les drones jouent le rôle de plates-formes volantes offrant une altitude adaptable et une mobilité naturelle. Ils nécessitent donc une infrastructure de communication sans fil fiable et

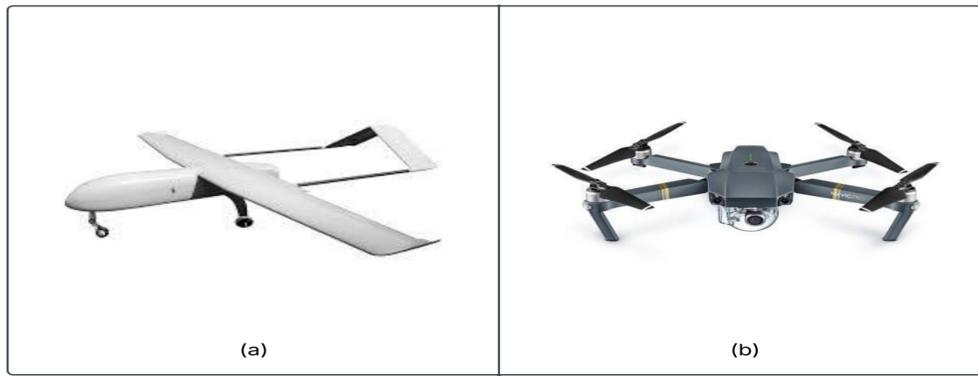


FIG. 6.1 – (a) Drone à voilure fixe. (b) Drone à voilure tournante.

sécurisée pour assurer le commandement, le contrôle et une transmission efficace des informations vers la station de contrôle au sol [155].

Il est donc essentiel d'incorporer une technologie de communication sans fil adéquate dans les plateformes drones pour assurer une connectivité omniprésente et un service fluide. Une technologie comparable est aussi prometteuse dans les communications de secours, où les drones peuvent véhiculer des stations de base commerciales et soutenir les réseaux sans fil terrestres, surtout lorsque les stations de base au sol sont défaillantes (par exemple, lors d'interventions de secours en cas de catastrophe ou dans des contextes militaires).

Architecture d'un drone

La sécurité de navigation et la précision de la localisation sont des aspects fondamentaux pour l'utilisation des drones dans divers domaines, tels que la cartographie, la surveillance, ainsi que les missions de recherche et de sauvetage. Pour assurer une autonomie optimale, les drones doivent être en mesure de suivre un chemin précis tout en évitant les obstacles. Par ailleurs, leur architecture joue un rôle déterminant dans l'amélioration de la navigation et de la localisation.

D'une manière générale, l'architecture d'un drone repose sur plusieurs composants essentiels, notamment les systèmes de propulsion, de contrôle de vol, de communication, de capteurs et de charge utile. Ces modules sont interconnectés et collaborent afin d'assurer un vol précis et sécurisé du drone. Toutefois, la conception d'un drone axé sur la sécurité de navigation et la précision de la localisation soulève plusieurs défis. Parmi ceux-ci figurent l'usurpation du signal GPS, ainsi que les risques de collision avec d'autres drones ou des obstacles. La Figure 6.2 présente l'architecture d'un drone optimisée pour la sécurité de navigation et la précision de la localisation [156].

1. **Système de propulsion** Le système de propulsion constitue un élément essentiel d'un drone, car il génère la force nécessaire au maintien du vol. Il peut être alimenté par différentes sources d'énergie, notamment des moteurs électriques, des moteurs à combustion interne ou des turbo-réacteurs.
2. **Système de contrôle et de commande** Le système de contrôle et de commande constitue un élément fondamental de l'architecture d'un drone, car il orchestre la gestion des différents sous-systèmes et la prise de décision en vol. Il repose sur plusieurs composants essentiels, notamment les capteurs, les calculateurs, les actionneurs et les dispositifs de communication.
3. **Système de communication** Le système de communication d'un UAV joue un rôle essentiel en assurant l'échange d'informations entre l'appareil et sa station sol, ainsi qu'avec d'autres UAVs au sein d'un réseau FANET (Flying Ad hoc Network). Il permet la transmission de données cruciales, telles que la position, la vitesse, l'altitude et les informations collectées par les capteurs. De plus,

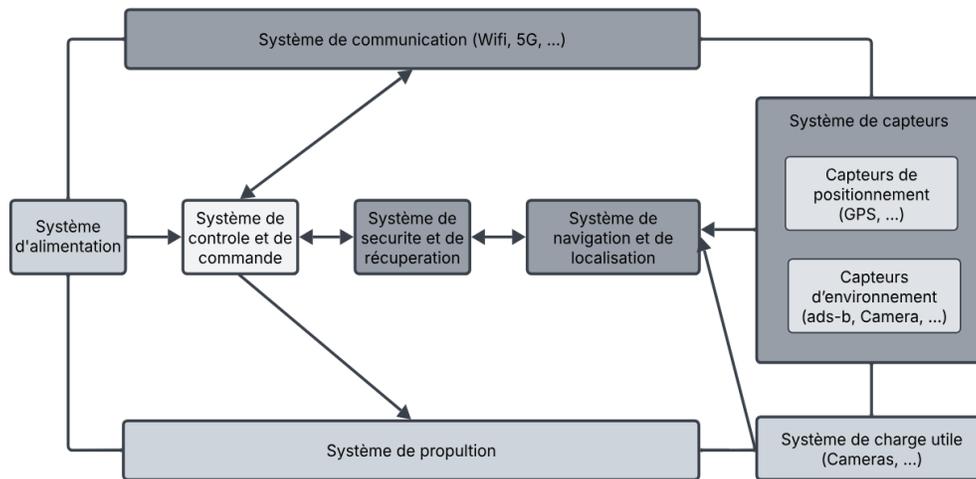


FIG. 6.2 – Architecture modulaire d'un drone.

il sert à recevoir des instructions de la station sol, notamment des ajustements de trajectoire ou des commandes spécifiques, comme le largage de charges utiles.

4. **Système de charge utile** La charge utile d'un drone représente un élément clé de son architecture. Elle englobe tous les équipements embarqués qui, bien qu'ils ne soient pas indispensables au vol, permettent à l'appareil d'accomplir sa mission spécifique. En fonction de l'objectif du drone, la charge utile peut comprendre divers capteurs, tels que des caméras, des scanners laser ou des radars, utilisés pour des missions de surveillance, de reconnaissance ou de cartographie.
5. **Système d'alimentation électrique** Le système d'alimentation électrique est un élément essentiel de l'architecture d'un drone, garantissant une source d'énergie fiable et suffisante pour assurer son vol et l'exécution de ses missions. Plusieurs technologies peuvent être utilisées pour alimenter un drone, notamment les batteries, les panneaux solaires, les générateurs thermiques et les piles à combustible, chacune présentant des avantages et des limitations en termes de coût, d'autonomie, de puissance et de poids.
6. **Système de sécurité et de récupération** La sécurité constitue un aspect fondamental dans la conception des drones, garantissant non seulement la protection de l'appareil, mais aussi celle des données et des personnes. Les systèmes de sécurité englobent plusieurs dispositifs, notamment des mécanismes de récupération tels que les parachutes et les airbags, des capteurs permettant de détecter d'éventuelles pannes ou erreurs, ainsi que des protocoles de communication sécurisés visant à prévenir les cyberattaques.
7. **Système de capteurs** Les capteurs sont des dispositifs électroniques conçus pour mesurer et enregistrer les variations de l'environnement. Ils jouent un rôle essentiel dans la collecte de données relatives aux conditions atmosphériques, telles que la température, l'humidité, la pression ou encore la vitesse du vent.
8. **Système de navigation** Le système de navigation est un composant fondamental de l'architecture d'un drone, permettant de déterminer sa position, sa vitesse et son orientation dans l'espace. Il est constitué de plusieurs modules essentiels qui assurent le déplacement autonome de l'appareil dans l'espace aérien. Ces modules incluent généralement un récepteur GPS pour le positionnement global, une centrale inertielle (IMU) pour mesurer l'accélération et la rotation, ainsi que des capteurs supplémentaires tels que des baromètres, des magnétomètres et des capteurs optiques pour améliorer la précision de la navigation.
9. **Système de localisation** La précision de la localisation et la sécurité de navigation sont des

aspects fondamentaux pour assurer l'efficacité et la fiabilité des missions des drones. Pour répondre à ces exigences, l'architecture d'un drone doit intégrer plusieurs technologies, notamment des capteurs de positionnement, des systèmes de navigation par satellite, des systèmes de cartographie et des dispositifs de détection d'obstacles.

6.2.2 Architectures de communication d'un réseau FANET

Architecture de communication centralisée

Cette architecture repose sur un lien sans fil direct entre un nœud centralisé [157], tel qu'une station au sol, et les drones environnants. Dans ce modèle, chaque drone communique exclusivement avec la station sol pour transmettre les données de sa charge utile et recevoir les instructions de commande et de contrôle. L'absence de connexion directe entre les drones implique que tout échange d'informations entre eux doit transiter par la station sol, qui joue alors le rôle de nœud relais. Une représentation de cette architecture est illustrée dans la Figure 6.3.a. Cette architecture présente plusieurs inconvénients :

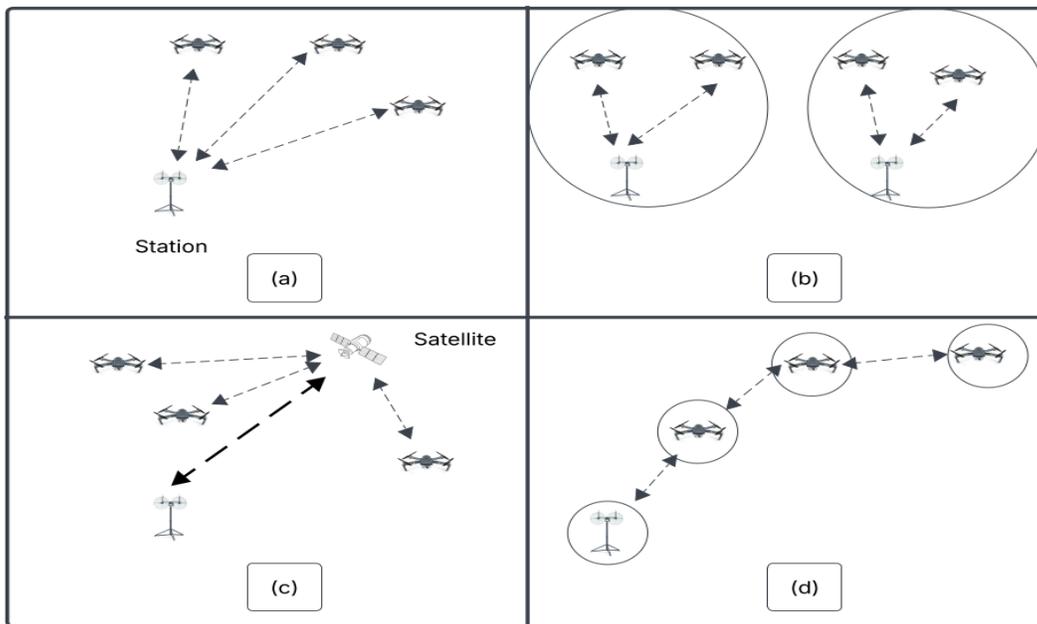


FIG. 6.3 – Types d'architecture de communication dans un réseau FANET.

- Le débit et la bande passante dépendront du nombre de drones présents dans le réseau, étant donné que la station au sol communique avec chacun d'eux. Par conséquent, pour assurer le bon fonctionnement d'un réseau à forte densité, il est essentiel de prévoir une quantité adéquate de bande passante, qui peut s'avérer conséquente.
- La valeur de la latence de transfert des paquets de données entre deux drones voisins peut être élevée en raison du passage obligatoire par la station au sol [158].
- Si un obstacle, tel qu'une montagne ou un bâtiment, se trouve entre un drone et la station au sol, le signal peut être bloqué, empêchant ainsi l'exécution des communications C2 par les drones. Par conséquent, les nœuds ne peuvent s'éloigner que jusqu'à une certaine distance maximale de la station au sol, limitant ainsi leur rayon d'opération. L'utilisation d'équipements radio avancés pourrait permettre d'étendre la portée de communication, mais ces systèmes peuvent nécessiter une puissance de transmission élevée [159], ce qui est interdit par la réglementation [160].

- La présence d'une entité centrale dans le réseau le rend vulnérable, car une mise hors service de la station au sol, notamment en cas d'attaque, compromet la disponibilité des drones.

Architecture de communication par satellite

Une autre architecture de communication centralisée pouvant être envisagée pour connecter les drones repose sur l'utilisation d'un satellite de communication (la Figure 6.3.c). Dans ce cadre, le satellite joue le rôle de relais de communication [157]. Il capte les signaux émis par la station au sol via ses antennes de réception, puis les transpose en fréquence et les amplifie avant de les retransmettre vers les drones. Deux types de satellites peuvent être utilisés : le satellite géostationnaire et le satellite en orbite. Le premier est positionné sur le plan équatorial et tourne à la même vitesse et dans le même sens que la Terre, ce qui lui permet de rester fixe par rapport à un point au sol. Le second, quant à lui, se déplace et couvre successivement différentes zones géographiques.

L'utilisation des satellites offre une couverture plus étendue et efficace qu'une architecture de communication centralisée classique. Elle améliore ainsi l'interconnexion du réseau de communication des drones, indépendamment de leurs trajectoires. Cependant, cette connectivité repose toujours sur un routage via un système centralisé, en l'occurrence le satellite. Étant donné la nature en temps réel des échanges entre les drones, des latences importantes peuvent survenir lors de la transmission des données entre les nœuds. Par ailleurs, la présence d'obstacles autour de la station sol, tels qu'un immeuble, peut affaiblir voire interrompre totalement la communication avec le satellite.

Architecture de communication réseau cellulaire (semi centralisé)

Cette architecture, couramment utilisée en téléphonie, repose sur une infrastructure de stations de base. Le réseau est divisé en cellules, déployées en fonction de la densité souhaitée. Chaque cellule peut contenir un sous-ensemble de drones ainsi qu'une station sol chargée de gérer le groupe [157]. Les communications entre groupes transitent obligatoirement par la station sol. Contrairement à une architecture entièrement centralisée, une communication directe entre drones est possible, mais uniquement au sein d'une même cellule. Par ailleurs, l'extension de la portée de la mission peut être assurée par le déploiement de plusieurs stations. Ces stations offrent plusieurs liens de communication, permettant ainsi de basculer vers une connexion alternative en cas de dégradation des performances sur un lien donné.

Cette architecture présente des limites en raison de son coût de déploiement élevé. En effet, la mise en place de cette infrastructure représente un défi majeur dans les zones dépourvues de couverture existante. De plus, si l'utilisation des drones reste occasionnelle, comme dans le cas des missions de surveillance après des catastrophes naturelles, le retour sur investissement peut ne pas être assuré [157]. Une illustration de cette architecture est donnée par la Figure 6.3.b.

Architecture de communication ad hoc

Un réseau ad hoc sans fil (voir Figure 6.3.d) se compose d'entités mobiles équipées d'une ou plusieurs interfaces radio, formant un réseau de communication temporaire en fonction des besoins de l'application. Ces nœuds peuvent rejoindre ou quitter le réseau à tout moment. Ce type de réseau est décentralisé et capable de s'auto-organiser sans nécessiter d'infrastructure fixe. Lorsqu'un émetteur n'est pas à portée directe du destinataire, les données sont relayées de nœud en nœud le long d'un chemin dynamique, ajusté en fonction des changements de topologie. Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels, la zone de couverture correspond à l'espace géographique dans lequel les nœuds sont répartis. Le réseau ad hoc sans fil facilite la communication entre deux nœuds même lorsqu'ils ne sont pas à portée directe l'un de l'autre, en utilisant d'autres nœuds comme relais pour

acheminer les données. Parmi les avantages de l'architecture de communication ad hoc par rapport aux autres types d'architectures dans le cadre d'un réseau FANET nous citons :

- La capacité de mise à l'échelle et la reconfiguration flexible des missions de la flotte de drones : avec une infrastructure centralisée ou un système basé sur satellite, la zone d'opération est restreinte par la couverture du relais de communication. De plus, la présence d'obstacles peut interrompre les échanges entre les drones. En revanche, l'architecture ad hoc permet de créer une chaîne de communication entre les drones, facilitant ainsi le contournement des obstacles.
- La robustesse des communications dans un système aéronautique sans pilote : les drones échangent en temps réel des messages relatifs aux commandes, à la configuration et à l'exécution de la mission. Cet échange se déroule dans un environnement dynamique où les liens de communication sont instables et peuvent être interrompus. De plus, en fonction des exigences de leur mission, certains drones peuvent entrer ou sortir du réseau de communication. Grâce à sa capacité d'auto-organisation, un réseau ad hoc sans fil permet aux drones de rétablir la connectivité en recherchant automatiquement un autre chemin en cas de rupture d'un lien.
- L'absence de besoin d'une infrastructure dédiée : contrairement aux autres types de réseaux, les réseaux ad hoc sans fil fonctionnent sans infrastructure centralisée. Chaque nœud du réseau joue un rôle actif dans l'établissement et le maintien de la connectivité, assurant ainsi une communication autonome et flexible.
- L'adoption d'un réseau ad hoc sans fil garantit à la fois mobilité et flexibilité [161]. Grâce à sa topologie dynamique, les nœuds mobiles peuvent se déplacer librement et de manière autonome en fonction des exigences de la mission. De plus, la nature des liens, qu'ils soient unidirectionnels ou bidirectionnels, permet aux nœuds d'intégrer ou de quitter le réseau sans contrainte.
- Dans un réseau ad hoc mobile, la sécurité est répartie entre les nœuds, contrairement aux réseaux centralisés ou cellulaires. Ainsi, il n'existe pas de point unique de vulnérabilité. Chaque nœud joue un rôle actif dans le maintien de l'intégrité du réseau en mettant en œuvre des mécanismes de routage sécurisé permettant de vérifier l'authentification des messages échangés.

6.3 Le routage dans les réseaux FANETs

Le routage dans les réseaux aériens ad hoc représente un défi majeur en raison de leurs caractéristiques dynamiques et contraignantes. Contrairement aux réseaux ad hoc traditionnels (MANETs), les FANETs se distinguent par une mobilité élevée, une topologie en constante évolution et des contraintes strictes en matière d'énergie, de bande passante et de latence. Le principal problème réside dans la capacité à maintenir des chemins de communication stables et efficaces entre les drones, malgré leurs déplacements rapides et imprévisibles. Les protocoles de routage classiques, conçus pour des réseaux plus statiques ou à mobilité modérée, ne sont pas toujours adaptés à cette forte dynamique, ce qui entraîne des interruptions fréquentes des connexions et une augmentation du taux de paquets perdus. De plus, les FANETs peuvent être déployés dans des environnements hostiles où les interférences, les obstacles physiques et les cyberattaques (comme l'usurpation de signal GPS ou le brouillage) peuvent compromettre la fiabilité des communications. Pour répondre à ces défis, les méthodes bio-inspirées offrent des solutions innovantes et adaptatives, s'appuyant sur les comportements observés dans la nature pour optimiser le processus de routage. Par exemple, des algorithmes inspirés des colonies de fourmis permettent de trouver des chemins optimaux en s'appuyant sur des mécanismes distribués d'exploration et de renforcement des chemins les plus performants. De même, les algorithmes basés sur le vol des oiseaux exploitent la communication entre les agents pour ajuster dynamiquement les chemins. D'autres approches, comme celles inspirées du système immunitaire ou des essaims de lucioles, permettent d'améliorer la résilience du réseau face aux défaillances ou aux attaques. Ces méthodes bio-inspirées sont particulièrement efficaces

pour l'auto-organisation des drones, la réduction de la surcharge de contrôle et l'optimisation de la consommation énergétique, rendant ainsi le routage plus robuste et plus adapté aux contraintes des FANETs.

6.4 Présentation du protocole de routage SE-RPCS

SE-RPCS est un protocole de routage multi-chemins énergétique et stable, conçu pour les réseaux FANETs. Il est basé sur un algorithme bio-inspiré appelé recherche coucou (Cuckoo Research) qui fait partie de la famille des algorithmes d'intelligence en essaim. Nous avons choisi cette méthode en raison de sa simplicité et de sa robustesse par rapport à d'autres méthodes telles que PSO, DE et SA [162] [163]. Notre solution sélectionne les chemins optimaux entre un drone source et un drone de destination en fonction de la fonction d'énergie et de stabilité du lien.

Dans ce qui suit, nous détaillerons les différentes étapes de notre protocole de routage SE-RPCS. Dans notre réseau FANET, chaque drone est supposé avoir un identifiant unique et est équipé d'une batterie à énergie variable.

6.4.1 Processus de découverte des chemins

Pour notre solution de routage, la découverte des chemins s'inspire du protocole de routage multi-chemins AOMDV [54]. Durant cette phase, quatre types de paquets sont utilisés par tous les drones : Route Request RREQ, Route Reply RREP et le paquet Hello pendant la phase de découverte, et Route Error pour la maintenance. Chaque drone possède sa propre table de routage. Nous avons apporté des changements à la structure des messages de contrôle de base pour qu'elle soit conforme à notre démarche axée sur les exigences d'énergie du nœud et de la stabilité du lien. Les champs qui ont été ajoutés sont :

- Concernant les paquets de type RREQs et Hello, Le nœud émetteur n_i ajoute avant chaque émission de paquet trois informations : $E_{i,j}(t)$, x_i et y_i , qui représentent respectivement son énergie résiduelle et ses coordonnées.
- Pour les paquets de type RREP, un nouvel champ est ajouté comprenant une matrice qui contient les informations de ce nœud et de tous ses voisins, avec leurs valeurs de stabilité et leurs énergies résiduelles.

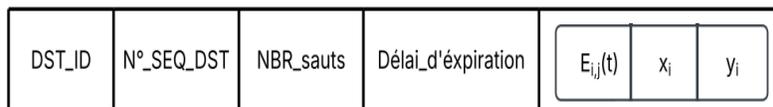


FIG. 6.4 – Structure du nouveau message Hello.

Dans tous les paquets, les champs source et destination font référence respectivement au nœud source et au nœud de destination, tandis que le champ du numéro de séquence sert à garantir la fraîcheur des chemins. La Figure 6.4 illustre la structure du message de type Hello, tandis que la Figure 6.5 montre celle du message de type RREQ de notre protocole.

De plus, des modifications ont été apportées à la table de routage (l'intégration des valeurs de la fonction de stabilité $f_s(t)$ et de la fonction d'énergie $f_e(t)$ comme illustré par la Figure 6.6.

Lorsqu'un drone source souhaite transmettre des paquets de données à un drone destination, il recherche la disponibilité d'un chemin valide dans sa table de routage ; s'il le trouve, il envoie les paquets qui sont dans sa file d'attente ; sinon, il lance un processus de découverte des chemins en diffusant un paquet de type RREQ à tous ces drones voisins avec des nouvelles informations

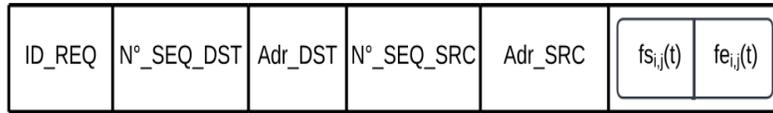


FIG. 6.5 – Structure du nouveau message RREQ.

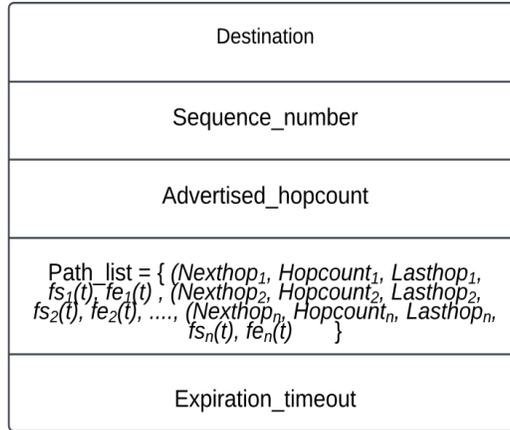


FIG. 6.6 – Structure du nouveau message RREQ.

à savoir : son énergie résiduelle et ces coordonnées. Un RREQ_Timer est initialisé par ce drone source pour vérifier si le drone destination est joignable. Lorsque chaque drone intermédiaire reçoit le paquet RREQ, il compare les deux numéros de séquence enregistrés dans sa table de routage et dans le paquet reçu, s'assurant que le nombre de sauts du chemin enregistré dans le paquet est supérieur à celui de la table. Par la suite, le drone intermédiaire calcul la valeur de la fonction du stabilité de cette liaison, puis enregistre cette valeur avec l'énergie résiduelle du drone émetteur du paquet RREQ dans sa table de voisinage. Après cela, il maintient le chemin inverse vers le drone source. Si le drone intermédiaire a un chemin valide vers le drone de destination, il génère un message de réponse de type RREP et le renvoie par le chemin inverse vers le drone source. Sinon, il incrémente la valeur du hop-count et diffuse le paquet RREQ à ses voisins. L'algorithme suivant (Algorithme 11) décrit le traitement du nouveau message de type RREQ jusqu'à atteindre le drone de destination.

La même procédure sera exécutée pour chaque drone intermédiaire jusqu'à ce que le message de type RREQ parvienne au drone cible, ou lorsque le RREQ_Timer arrive à expiration sans avoir reçu de réponse du message RREP. Il est à noter que le temps d'expiration est contrôlé à chaque réception d'un message de contrôle. Tout message qui dépasse ce délai sera éliminé sans aucun traitement. En outre, à chaque drone, il est nécessaire de contrôler le numéro de séquence du drone source ou de destination (SeqN) pour assurer la fraîcheur des informations du chemin et prévenir une boucle de routage. Si un message reçu a un numéro de séquence supérieur à celui enregistré dans la table de routage pour le même chemin, le drone efface tous les chemins existants vers le drone émetteur et établit une nouvelle entrée de route.

Le drone de destination commence à répondre aux paquets RREQ reçus en envoyant un paquet RREP. Il crée et enregistre le chemin inverse vers le drone source et envoie en mode unicast le paquet RREP avec de nouvelles informations telles que : l'identifiant des drones, leurs énergies résiduelles, les valeurs de stabilité des liens entre les drones et leurs voisins.

Lorsque les drones intermédiaires reçoivent le paquet RREP, ils vérifient le numéro de séquence du drone source pour s'assurer de la fraîcheur des données et éviter les boucles. Si la valeur du

```

1 Entrées :
2  $d_s$  : drone source,  $d_d$  : drone destination,  $d_i$  : le drone qui transfère le paquet.
3 début
4   si ( $SeqN\_RREQ] > SeqN\_d_s$ ) alors
5     | Supprimer tous les chemins inverses vers  $d_s$  de la table de routage.
6     |  $SeqN\_d_s \leftarrow SeqN\_RREQ$ 
7     |  $advertised\_hop\_d_s \leftarrow infini$ 
8     | Créez un chemin inverse de  $d_s$  à  $d_i$  avec ( $Nbsauts\_RREQ + 1$ ).
9   sinon si ( $SeqN\_RREQ] == SeqN\_d_s$ ) alors
10    | Insérer un nouveau chemin inverse de  $d_s$  à  $d_i$  avec ( $Nbsauts\_RREQ + 1$ )
11  sinon
12    | supprimez le paquet RREQ
13  fin
14 fin
    
```

Algorithme 11 : Processus de découverte des chemins.

numéro de séquence enregistrée dans le paquet RREP est supérieure à celle de la table de routage, ils suppriment le chemin enregistré et enregistrent le nouveau chemin. Lorsque le premier paquet RREP arrive au drone source, un RREP_Timer est déclenché pour interrompre le transfert des paquets de données et collecter davantage de paquets RREP. L'algorithme ci-dessous (Algorithme 12) décrit le traitement du nouveau message RREP jusqu'à atteindre le drone source.

Si le drone source n'a pas reçu de message RREP après l'expiration du RREQ_Timer (indiquant que le drone cible n'est pas accessible), il initie une nouvelle procédure de découverte et diffuse le message de type RREQ avec un numéro de séquence de destination incrémenté ($SeqN++$). Cette action sera répétée un nombre prédéterminé de fois si aucune réponse n'est parvenue. Si le drone source a effectué le nombre maximal de tentatives sans obtenir de réponse RREP, il abandonne alors la procédure de découverte et considère le drone destination comme inaccessible.

6.4.2 Processus de recherche du coucou

La recherche du coucou est un algorithme bio-inspiré basé sur la population qui s'inspire du comportement des oiseaux parasites du coucou dans la nature. Ces oiseaux ont une méthode de reproduction agressive où la femelle pond ses œufs dans le nid d'une autre espèce, confiant la responsabilité de l'incubation, de l'alimentation et de l'élevage de leurs œufs aux parents adoptifs [164]. Le principe de la recherche du coucou repose sur trois principes :

- Chaque femelle pond un seul œuf à la fois et le dépose au hasard dans un nid. Chaque œuf de coucou représente une nouvelle solution, chaque œuf dans un nid représente une solution.
- La nouvelle génération est construite à partir des meilleurs nids qui ont des œufs de bonne qualité.
- Les coucous étrangers peuvent être trouvés par les oiseaux hôtes avec une probabilité comprise entre 0 et 1. Ces oiseaux hôtes ont deux possibilités : soit éliminer le coucou étranger, soit abandonner le nid et en construire un autre dans une nouvelle position.

Dans le cadre de l'algorithme de recherche du Coucou, les chercheurs ont intégré une nouvelle technique appelée le vol de Lévy permettant de rechercher et d'explorer de nouvelles solutions. Cette technique est une distribution statistique utilisée pour modéliser des mouvements aléatoires dans divers contextes par la fonction suivante :

```

1  début
2  | si ( $SeqN\_RREP > SeqN\_d_d$ ) // le message est récent et fraîche. alors
3  |   Supprimer tous les chemins inverses vers  $d_d$  de la table de routage.
4  |    $SeqN\_d_d \leftarrow SeqN\_RREP$ 
5  |    $advertised\_hop\_d_d \leftarrow infini$ 
6  |   Créer un chemin inverse vers  $d_d$  via  $d_i$  avec  $(hop - count\_RREP + 1)$ .
7  | sinon
8  |   si ( $SeqN\_RREP == SeqN\_d_d$ ) alors
9  |   | Insérer un nouveau chemin inverse vers  $d_s$  via  $s_i$  avec
10 |   |    $(hop - count\_RREP + 1)$ .
11 |   fin
12 | fin
13 | si ( $d_j == d_s$ ) alors
14 |   si (RREP est le premier) alors
15 |   | Définir  $RREP\_Time$  //attendre pour collecter plus de messages RREP.
16 |   fin
17 |   si (RREP\_Time est expiré) alors
18 |   | Commencez à envoyer le paquet de données via le chemin optimal.
19 |   fin
20 | sinon
21 |    $Nbsauts\_RREP ++$ 
22 |   Transférer RREP au saut suivant.
23 | fin

```

Algorithme 12 : Processus de découverte des chemins inverses.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \oplus Levy(\lambda) \quad (6.1)$$

avec : α : est la taille du pas, elle est supérieure à 0. $x_i(t+1)$: la nouvelle position du coucou. $x_i(t)$: l'ancienne position du coucou. $\alpha \oplus Levy(\lambda)$: valeur de la nouvelle direction mesurée par le vol de Lévy.

Le processus de recherche du Coucou CSP (Algorithme 13) est utilisé pour optimiser la recherche d'un nouvel ensemble de chemins entre les drones source et destination. La technique du vol de Lévy permet de réaliser les chemins de manière aléatoire des mouvements des drones intermédiaires. Chaque chemin découvert peut être modifié en ajoutant un déplacement des drones actuels basé sur la distribution de Lévy. Ce déplacement peut être contrôlé par la contrainte du voisinage entre les drones, puis nous allons recalculer la fonction de fitness pour les nouvelles solutions obtenues. La fonction de fitness à optimiser par l'algorithme de recherche de coucou est une fonction multi-objectifs avec deux paramètres : l'énergie et la stabilité des liens. Le but est de trouver des chemins plus stables et moins consommateurs d'énergie.

Nous considérons un réseau FANET comme un graphe $G(D, L)$ avec :

- Un ensemble de drones mobiles noté $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_i\}$.
- Un ensemble de liaisons entre chaque deux drones noté $L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_i\}$, un lien entre le drone d_i et d_j est noté L_{ij} .
- Un chemin est représenté par P_j , où P_j contient au moins deux drones et au moins un lien.

```

1  Entrée :
2  Tableau des chemins découverts.
3  La matrice d'information.
4  Sortie :
5  Tableau des nouveaux chemins  $New\_P[]$ .
6  POP : tout l'ensemble des chemins découverts.
7   $New\_P[] \leftarrow NULL$ 
8  Un chemin  $P_i$  de la population POP.
9  Un drone  $d_i$  du chemin  $P_i$ .
10 début
11   pour tous les (chemins de POP) faire
12     tant que ( $P_i \leftarrow GP(POP)$ ) faire
13       pour ( $(d_i \in P_i) \text{ et } (d \neq src) \text{ et } (d \neq dest)$ ) faire
14         Appliquer l'équation 6.1 du vol de Lévy et normaliser les valeurs.
15         Réparer le nouveau chemin obtenu en utilisant la matrice
16           d'information.
17       fin
18     fin
19   pour chaque (Nouveau  $P_i$ ) faire
20      $New\_P[] \leftarrow P_i$ 
21     Calculer la nouvelle fonction de fitness avec l'équation 6.8.
22   fin
23   retourner  $New\_P[]$ .
24 fin
    
```

Algorithme 13 : Algorithme CSP.

- La distance à l'instant t entre deux drones d_i aux coordonnées (x_i, y_i, z_i) et d_j aux coordonnées (x_j, y_j, z_j) est présentée par $d_{i,j}(t)$, elle est calculée par l'équation suivante :

$$d_{i,j}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2 + (z_i(t) - z_j(t))^2} \quad (6.2)$$

Paramètre de stabilité du lien

Étant donné que les drones sont mobiles dans notre réseau FANET, ils seront considérés comme la principale métrique pour calculer la stabilité du lien. Les informations collectées lors de la découverte sur les drones, telles que leur mouvement et leurs coordonnées, sont utilisées pour évaluer la stabilité d'un drone. Le message de type RREQ et Hello sont utilisés pour collecter ces données afin d'éviter la surcharge générée par l'envoi de messages. Lorsqu'un drone d_j veut calculer la distance $d_{i,j}$ qui le sépare d'un drone d_i , il doit récupérer les coordonnées qui sont reçues dans le paquet (RREQ ou Hello).

La valeur de stabilité d'un lien $L_{i,j}$, est définie comme :

$$fsl_{i,j}(t) = \frac{SDl_{i,j}(t)}{Ml_{i,j}(t)} \quad (6.3)$$

La moyenne des distances collectées entre deux drones d_i et d_j est notée $Ml_{i,j}(t)$, calculée par :

$$Ml_{i,j}(t) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} D_{i,j}(t)}{n} \quad (6.4)$$

L'écart type des distances collectées entre deux drones d_i et d_j noté $SDl_{i,j}(t)$ est calculé comme suit :

$$SDl_{i,j}(t) = \frac{1}{n} \times \sum_{t=t_1}^{t_n} |D_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)| \quad (6.5)$$

Le coefficient de variation à l'instant t , également défini comme l'écart type relatif, est noté $fsl_{i,j}(t)$. C'est une mesure normalisée de la dispersion d'une distribution de probabilité ou de fréquence. Pour notre solution, c'est la mesure des distances entre deux drones voisins. Si la valeur du coefficient de variation tend vers 0, alors on a une bonne distribution des distances, ce qui signifie que la liaison entre les drones est stable. Si la valeur du coefficient de variation tend vers 1, cela correspond à une mauvaise distribution, ce qui signifie que la liaison est instable.

La fonction de coût de stabilité du chemin P_j notée $fsp_j(t)$ à l'instant t , est le coût de stabilité maximal des liaisons constituant le chemin P_j .

Paramètre d'énergie

Le calcul de la fonction énergétique d'un chemin P_j est basé sur les énergies résiduelles des drones ($E_{i,j}(t)$) inclus dans ce chemin. La fonction d'énergie d'un drone d_i à l'instant t est calculée comme suit :

$$fen_{i,j}(t) = \frac{Elev_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t)} \quad (6.6)$$

$Elev_{i,j}(t)$ est donnée par :

$$Elev_{i,j}(t) = \frac{E_{i,j}(t)}{E_{average}(t)} \quad (6.7)$$

$E_{average,j}(t)$ représente l'énergie résiduelle moyenne des drones ayant participé à la constitution d'un chemin P_j entre le drone source et le drone destination. La valeur $DR_{i,j}(t)$ dépend du taux d'utilisation du drone par plusieurs chemins.

La fonction d'énergie d'un chemin P_j à l'instant t notée $fe_p_j(t)$ est le minimum des coûts énergétiques $fen_{i,j}(t)$ des drones inclus dans ce chemin.

La fonction fitness

Notre fonction fitness dépend de deux paramètres, à savoir : l'énergie et la stabilité du lien, sa formule est mentionnée comme suit :

$$fp_j(t) = \alpha \times fe_p_j(t) + \frac{\beta}{fsp_j(t)} \quad (6.8)$$

Notre protocole de routage SE-RPCS transmet les paquets de données sur le chemin qui a une valeur fitness élevée. Selon nos préférences, cette modélisation nous permet d'assurer l'efficacité et la fiabilité du routage. Par exemple, lorsque nous souhaitons économiser davantage d'énergie, nous donnons une valeur élevée au poids lié au critère énergétique ($\alpha > (1 - \alpha)$).

6.5 Évaluation des performances du protocole SE-RPCS

Nous avons utilisé le simulateur de réseau *NS2.35* pour évaluer les performances des protocoles de routage SE-RPCS, AOMDV et AODV. Nous utiliserons également l'outil *Bonnmotion* pour créer et analyser des scénarios de mobilité.

6.5.1 Environnement et paramètres de simulation

Nous avons choisi les mesures de performance suivantes pour l'évaluation de notre solution :

1. **Taux de livraison des paquets** : c'est le rapport entre le nombre total de paquets de données reçus par le drone de destination et le nombre total de paquets de données diffusés par le drone source.
2. **Overhead** : il s'agit du rapport entre le nombre de paquets de contrôle générés par tous les drones et le nombre de paquets de données reçus par le drone de destination.

Nous supposons que tous les nœuds du réseau sont équipés par des interfaces de communication sans fil IEEE 802.15.6. Nous avons réalisé 20 simulations pour chaque scénario. Le trafic CBR est utilisé pour modéliser la communication entre les nœuds du réseau. L'énergie résiduelle de chaque nœud est prise aléatoirement entre 10 et 50 joules. On suppose que l'énergie consommée par un nœud lors de la réception d'un paquet est de 12.84 dBm, ou lors de la transmission est égale à 13.80 dBm. La consommation d'énergie en mode inactif est ignorée. Les nœuds se déplacent à une vitesse qui atteint au maximum 3 m/s. La table suivante (Tableau 6.1) résume les paramètres de simulation.

Paramètre	Valeur
Simulateur	NS2.35
Type MAC	IEEE 802.11
Modèle de mobilité	RWP
Surface de simulation	$800m \times 800m \times 800m$
Agent de transport	UDP
Tupe de trafic	CBR
Durée de simulation	200 s
Nombre de drones	50/100
Énergie	30100 J
Vitesse Maximale	520 m/s
Puissance d'émission/réception	13.80 – 12.84 dBm
Taille des paquets	512 bits

TAB. 6.1 – Paramètres de simulation du protocole SE-RPCS.

6.5.2 Résultats de simulation et discussion

1. Taux de livraison des paquets

La Figure 6.7 présente le taux de livraison des paquets (PDR) des trois protocoles de routage dans deux scénarios avec 50 et 100 drones, où les drones se déplacent à des vitesses variées. Dans les deux scénarios, nous observons que le PDR diminue avec l'augmentation de la vitesse

des drones, ce qui est dû à l'instabilité croissante des connexions résultant de la mobilité élevée, entraînant des ruptures fréquentes de liens et une augmentation des pertes de paquets.

Cependant, la solution SE-RPCS se distingue nettement des protocoles classiques tels qu'AOMDV et AODV, en surpassant leur performance en matière de taux de livraison des paquets. Cette supériorité est attribuée à l'utilisation de la méthode bio-inspirée de recherche Cuckoo, qui permet une sélection optimale des chemins après leur découverte. Contrairement aux autres protocoles, SE-RPCS choisit les meilleurs chemins en fonction de deux critères cruciaux : énergie des nœuds et stabilité des liens.

Grâce à l'algorithme C2S, le protocole SE-RPCS est capable de trouver des solutions adaptées aux conditions dynamiques du réseau, en optimisant à la fois l'énergie et la stabilité des chemins. Cela lui permet de réduire les pertes de paquets et de maintenir une performance optimale même en présence de hautes vitesses et d'une mobilité importante. En revanche, AOMDV et AODV ne disposent pas de mécanismes aussi sophistiqués pour évaluer simultanément l'énergie et la stabilité des liens, ce qui les rend moins efficaces dans des environnements à haute mobilité. SE-RPCS offre une gestion plus intelligente des chemins, en utilisant l'algorithme de recherche Coucou pour optimiser l'énergie et la stabilité, ce qui se traduit par un PDR supérieur à celui des protocoles AOMDV et AODV, en particulier dans les réseaux de drones en mouvement rapide.

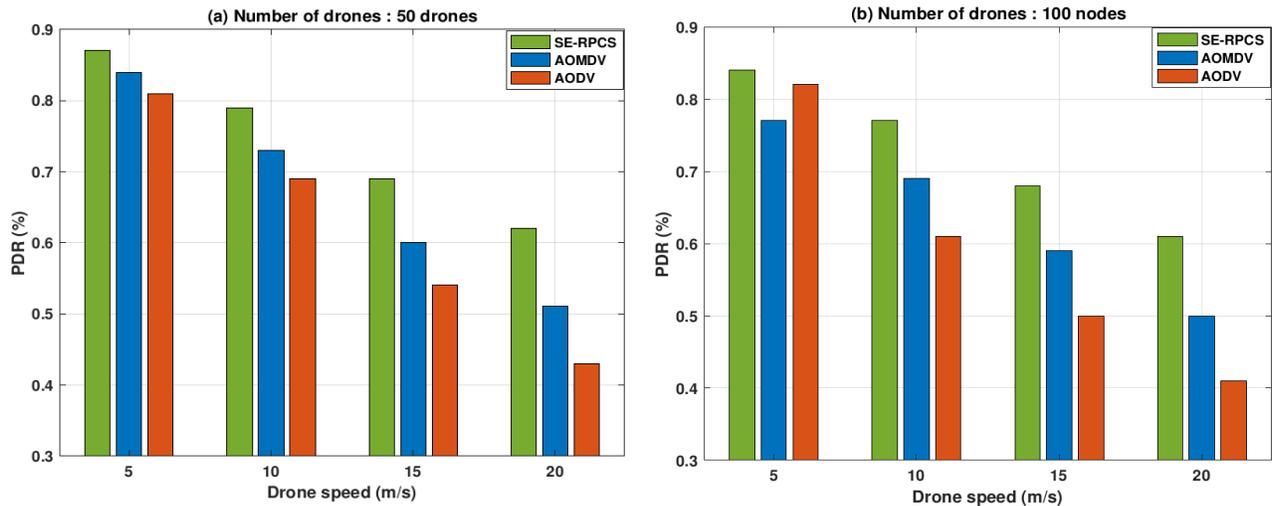


FIG. 6.7 – PDR vs La vitesse des drones.

2. Overhead

La Figure 6.8 présente les performances en termes de surcharge dans deux scénarios, où la vitesse des drones varie. Les résultats montrent que SE-RPCS génère un nombre significativement inférieur de paquets de contrôle par rapport à AOMDV et AODV. Cette réduction de la surcharge est principalement due à l'utilisation de la méthode bio-inspirée de recherche Coucou, qui optimise la sélection des chemins stable en prenant en compte le critère d'énergie des nœuds et de stabilité des liens.

En comparaison, AOMDV et AODV ne prennent pas en compte ces deux critères cruciaux dans leur processus de sélection des chemins. Ils se basent uniquement sur le nombre de sauts, ce qui peut mener à la sélection de chemins instables particulièrement dans des environnements à haute mobilité et, par conséquent, de surcharge due aux reconstructions de chemins fréquents.

Grâce à l'intégration de l'algorithme de recherche Coucou, qui optimise simultanément la stabilité des liens et l'énergie des nœuds, SE-RPCS réduit efficacement la surcharge en minimisant la nécessité d'échanges de paquets de contrôle. Cette approche permet à SE-RPCS d'offrir une

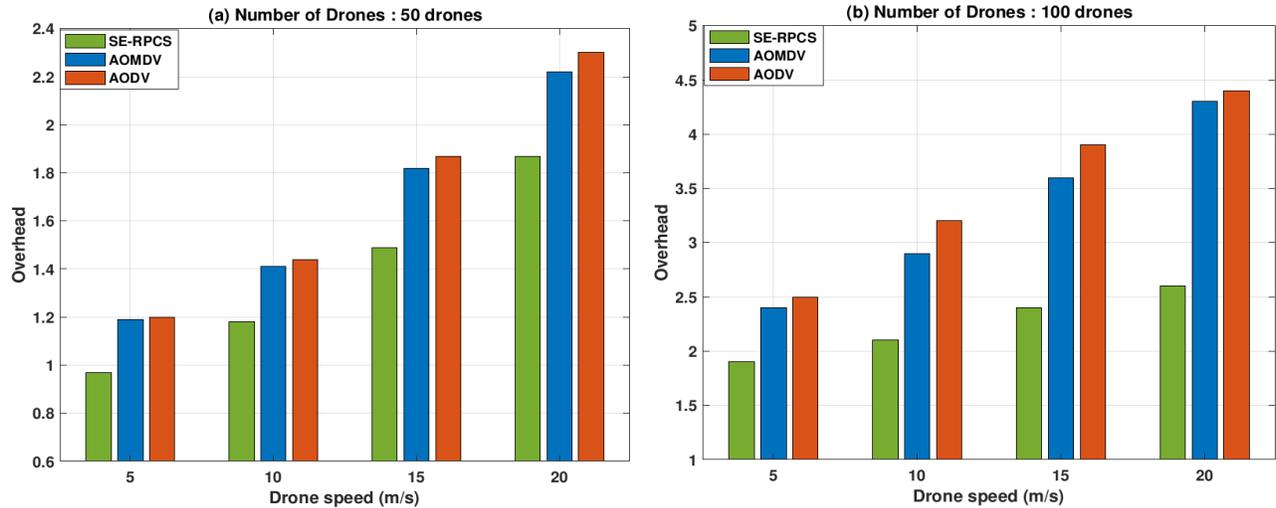


FIG. 6.8 – Overhead vs La vitesse des drones.

gestion plus stable et économe du réseau, en particulier lorsque la vitesse des drones augmente et que la mobilité devient un facteur clé d'instabilité.

6.6 Conclusion

Dans les réseaux FANETs, la grande mobilité des drones et leurs capacités électriques limitées sont les principales causes de défaillances de liaisons qui affectent considérablement leurs performances. Afin de résoudre ce problème, nous avons mis en œuvre une solution de routage multi-chemins stable et économe en énergie basée sur l'algorithme de recherche coucou, nommé SE-RPCS. La sélection du meilleur chemin est basée sur une fonction de fitness utilisant deux contraintes : l'énergie et la stabilité du lien. Les simulations montrent que notre solution surpasse les autres protocoles en termes de débit, de livraison de paquets et d'overhead.

Chapitre 7

Protocole de routage multi-chemins DERP

Contents

7.1 Introduction	139
7.2 Les réseaux de capteurs corporels WBANs	140
7.2.1 Définition d'un réseau WBAN	140
7.2.2 Architecture des réseaux WBANs	140
7.2.3 Applications des réseaux WBANs	141
7.2.4 Technologies de communication des réseaux WBANs	142
7.3 Présentation du protocole de routage DERP	142
7.3.1 Hypothèses et définitions du problème	142
7.3.2 Les étapes du protocole DERP	143
7.3.3 Procédure de maintenance des chemins du protocole DERP	149
7.4 Évaluation des performances du protocole DERP	149
7.4.1 Environnement et paramètres de simulation	150
7.4.2 Résultats de simulation et discussion	151
7.5 Conclusion	153

Référence :

1. Smail Omar, Soltani Kaouther et Mekkaoui Abedlkader : “DERP : Differential Evolution Based Routing Protocol for Wireless Body Area Networks. Journal of Information Science and Engineering, , 2025, vol. 41, no 3, p. 613-625.

7.1 Introduction

Le progrès scientifique dans le domaine de la technologie de communication sans fil et de l'informatique mobile est devenu de plus en plus populaire et utilisable. Cela a conduit à l'émergence d'une nouvelle sorte de réseaux sans fil, connus sous le nom de réseaux de capteurs sans fil (wireless sensor network). Ce réseau constitue une collection de capteurs destinés à partager des informations. Dans

le domaine médical, les réseaux de capteurs sans fil sont désignés sous le terme de WBAN (wireless body area network), ou réseaux de capteurs corporels sans fil. En effet, ils permettent de superviser et de suivre les patients à distance et en temps réel. Les informations collectées sont transmises à une équipe médicale à distance.

Les réseaux WBANs se distinguent par la mobilité de leurs composants, leur déploiement aisé (facile) et leur auto-organisation, ce qui présente des avantages pour le suivi des personnes âgées, des individus à mobilité réduite, des personnes à risques et atteintes de maladies chroniques. La consommation d'énergie lors des échanges de données dans les WBANs est l'un des problèmes majeurs. Plusieurs études ont été menées sur les méthodes d'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux WBANs. Cette contrainte liée à la question de la mobilité des nœuds a prouvé le besoin d'employer des protocoles de routage efficaces pour régler ces problématiques. Toutefois, les protocoles de routage qui se fondent uniquement sur l'économie d'énergie ne garantissent pas systématiquement des solutions optimales, car ils négligent d'autres contraintes comme la stabilité, la qualité, etc.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu général sur les réseaux WBANs (définition, architecture, domaines d'application, technologies de communication), puis nous présenterons quelques protocoles de routage implémentés pour résoudre le problème du routage dans ce type de réseau et qui utilisent des méthodes méta-heuristiques bio-inspirées. Par la suite, nous présenterons notre première contribution, qui consiste à développer un nouveau protocole de routage multi-chemins à lien disjoint basé sur la méthode bio-inspirée évolution différentielle avec prise en compte de la contrainte de stabilité et d'énergie pour le choix du meilleur chemin pour transférer les données. À la fin, nous détaillerons les résultats issus de la simulation de notre protocole de routage ainsi que des différents protocoles que nous avons examinés.

7.2 Les réseaux de capteurs corporels WBANs

7.2.1 Définition d'un réseau WBAN

Un réseau de capteurs corporels sans fil est un ensemble composé de petits capteurs qui peuvent être implantés ou placés à proximité directe du corps d'un patient. Chaque capteur, en général, a la capacité d'identifier une ou plusieurs propriétés physiologiques auprès du corps humain ou de son environnement. Le nœud capteur conserve et communique ensuite les informations mesurées, via un réseau sans fil, à une unité de traitement centralisée appelée serveur personnel. Par rapport aux WSNs, les WBANs ont des exigences plus strictes concernant la sécurité et la compacité des capteurs [165].

7.2.2 Architecture des réseaux WBANs

La Figure 7.1 illustre la structure hiérarchique de communication d'un réseau WBAN, qui se compose de trois niveaux. Nous identifions les communications à l'intérieur du WBAN (intra-WBAN), entre différents WBANs (inter-WBAN) et à l'extérieur du WBAN (beyond-WBAN), qui correspondent respectivement au premier, deuxième et troisième niveau [166].

1. **La communication intra-WBAN** : généralement, un réseau WBAN est structuré selon une configuration en étoile, où les capteurs transmettent les informations qu'ils ont rassemblées au coordinateur des capteurs BNC. Les échanges au sein du WBAN désignent la transmission de données entre les divers capteurs fixés sur le corps humain. Le BNC est chargé de la manipulation des données recueillies et de l'administration des nœuds de détection.

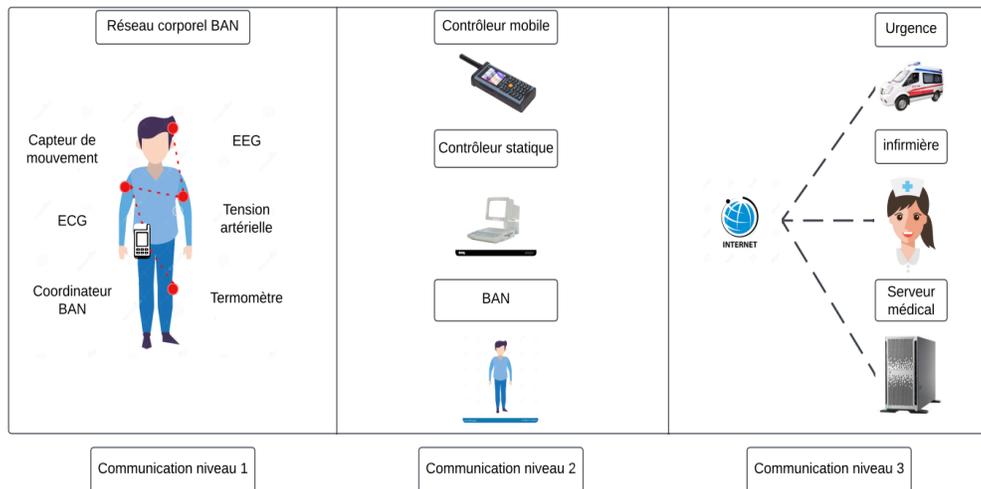


FIG. 7.1 – Architecture d'un réseau WBAN.

2. **La communication inter-WBAN :** en raison de la mobilité des patients munis de WBAN et des interruptions fréquentes de communication dans les zones urbaines où la couverture réseau est limitée voire inexistante, il s'avère complexe de transmettre les informations recueillies avec fiabilité. Dans un tel contexte, les WBANs font appel à ce type de communication et tirent parti de la communication coopérative et multi-sauts entre les BNCs pour garantir une transmission fiable de données de bout en bout en employant des technologies sans fil à courte distance telles que ZigBee et Wi-Fi.
3. **La communication Beyond-WBAN :** ce type sert à garantir un transfert sûr des données recueillies depuis le point de coordination du WBAN vers un centre de données éloigné. Les informations recueillies sont transmises à travers divers appareils intermédiaires, comme un assistant personnel numérique (PDA), un point d'accès (AP) ou un téléphone mobile employant plusieurs technologies de communication distinctes (Wi-Fi, GPRS, UMTS, 4G, etc.).

7.2.3 Applications des réseaux WBANs

Grâce aux progrès technologiques dans l'électronique, l'informatique et les télécommunications qui ont facilité la miniaturisation des capteurs peu coûteux, ainsi que l'élargissement de la gamme de capteurs proposés (température, mouvement, etc.) et en raison de leur influence sur l'amélioration du bien-être de l'utilisateur, on observe une expansion des applications des WBANs dans divers domaines liés au corps humain et à son environnement. On peut classer ces applications principalement selon leur usage : médical ou non médical. Les applications dans le domaine médical englobent les systèmes de santé élaborés essentiellement pour les individus âgés et malades. Des applications courantes de ce type incluent la détection précoce, la prévention, le suivi des maladies, la gestion des traitements médicaux, l'aide à domicile pour les personnes âgées, la réhabilitation post-chirurgicale ainsi que les outils d'assistance au quotidien qui rehaussent la qualité de vie des individus handicapés. Les applications non médicales englobent le mode de vie, le sport et les loisirs. Ces applications incluent : la détection de mouvements et de gestes pour les jeux interactifs et les applications de suivi de la condition physique, la reconnaissance cognitive et émotionnelle pour l'aide à la conduite ou l'interaction sociale, ainsi que des informations pertinentes dans les domaines en relation avec le sport. Par exemple, les données sensorielles relatives aux mouvements corporels des sportifs peuvent être analysées pour économiser de l'énergie et permettre à l'athlète d'atteindre

sa performance optimale sur une durée prolongée [166].

7.2.4 Technologies de communication des réseaux WBANs

Actuellement, diverses normes de communication sans fil telles que IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 et IEEE 802.15.4 sont mises en application pour garantir la transmission des données dans les WBAN. Toutefois, ces normes sont élaborées pour des environnements qui présentent des caractéristiques distinctes (MANETs, WSNs et WPANs) par rapport aux WBANs. Par conséquent, elles ne sont pas en mesure de satisfaire à toutes les exigences des WBANs. La consommation énergétique des standards IEEE 802.11 et IEEE 802.15.1, qui peuvent atteindre jusqu'à 800 mW et 100 mW respectivement, est trop importante pour convenir aux nœuds basse consommation des WBANs. Dans les réseaux WBANs, la norme IEEE 802.15.4 est celle qui est la plus fréquemment utilisée. Toutefois, cette norme n'est pas capable de gérer des applications à haut débit ou d'assurer une transmission de données dépassant les 250 Kbps. Par conséquent, le groupe de travail IEEE 6 a été constitué afin d'établir une norme pour la couche MAC des WBANs qui opèrent dans le cadre de communications sans fil à courte distance près ou sur le corps humain. Ce groupe a élaboré la norme IEEE 802.15.6, qui prend la qualité de service et rend possible le fonctionnement des appareils avec une transmission à faible puissance, assurant la protection du patient en réduisant le taux d'absorption spécifique (SAR) dans le corps et en prolongeant la durée de vie de la batterie. La norme IEEE 802.15.6 propose un débit de transmission de données pouvant atteindre 10 Mbps et intègre trois couches physiques distinctes : les communications du corps humain (HBC), la PHY à bande étroite (NB) et la PHY à ultra-large bande (UWB), afin de répondre à l'éventail varié des applications de surveillance.

De plus, la norme propose une structure de trame plus flexible au niveau de la couche MAC, qui supporte divers modes d'accès aux canaux [166]. Diverses recherches [167] [168] ont prouvé que la norme IEEE 802.15.6 est jugée plus adaptée pour les communications WBANs comparativement aux autres normes, particulièrement pour les applications où la latence et la fiabilité sont cruciales.

7.3 Présentation du protocole de routage DERP

Nous avons proposé un nouveau protocole de routage nommé DERP (Differential Evolution Based Routing Protocol for Wireless Body Area Networks) [27]. DERP est un protocole de routage réactif multi-chemins conçu pour un réseau WBAN constitué d'un ensemble de nœuds mobiles à batterie limitée. Cette solution de routage est basée sur le protocole de base AOMDV (utilise le nombre de sauts comme contrainte d'évaluation) [54] et sur une méthode bio-inspirée évolution différentielle (ED), en tenant compte des contraintes d'énergies des nœuds et de stabilité des liaisons.

7.3.1 Hypothèses et définitions du problème

Comme nous l'avons cité précédemment, on peut représenter un réseau sans fil tel que le réseau WBAN comme étant un graphe non orienté $G = (V, E)$, où V représente l'ensemble des nœuds (capteurs) du réseau. Chaque nœud possède une liste des voisins (les nœuds adjacents). Cette liste sera déterminée par l'envoi périodique des paquets de type HELLO. E représente l'ensemble des liens bidirectionnels entre les nœuds du WBAN. Nous avons proposé deux processus pour qu'un nœud du réseau détermine la liste de ces voisins et remplisse sa table de voisinage.

1. Message HELLO

On part du principe qu'un nœud noté i désire connaître ses voisins, il transmet alors régulièrement des paquets de type HELLO. Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer la distance entre le

nœud i et les autres nœuds.

Le calcul de $D_{(i,j)}$ s'effectue en se basant sur l'équation (7.1); si la distance $D_{(i,j)}$ est inférieure à Max_d , le nœud j reçoit le paquet hello; sinon, ce dernier est rejeté. Le nœud j qui reçoit le paquet enregistrera les informations dans sa table de voisins pour une future utilisation. Si le prochain message Hello du même expéditeur n'est pas réceptionné dans une certaine période, cela indique que l'expéditeur s'est éloigné ou a rencontré une défaillance. Tous les enregistrements associés à cet expéditeur dans la table de voisins seront supprimés et la table de routage sera actualisée.

$$D_{j,Dst}(t) = \sqrt{(X_j - X_{Dst}(t))^2 + (Y_j - Y_{Dst}(t))^2} \quad (7.1)$$

Max_d représente la distance maximale entre le nœud i et le nœud j .

2. Algorithme de construction de table de voisins

Nous supposons que le nœud j appartient à la liste des voisins du nœud i et qu'il se trouve entre le nœud i et le nœud de destination Dst . Le Figure 7.2 présente la structure de la table des voisins du nœud i . Elle contient les détails concernant l'identifiant du périphérique, l'identifiant du voisin (ID_j) ainsi que k distance entre le nœud i et son voisin ($D_{(i,j)}$) pour un traitement ultérieur. Grâce au champ pos , nous sommes en mesure de savoir quelle distance nous souhaitons modifier.

ID _j	Dist ₁ , Dist ₂ ,, Dist _k	Pos
-----------------	--	-----

FIG. 7.2 – Structure de la table des voisins.

7.3.2 Les étapes du protocole DERP

DERP comprend quatre étapes (voir Figure 7.3) : l'initialisation du vecteur de population, la mutation, le croisement et la sélection de la génération suivante, à l'instar de l'algorithme ED traditionnel, comme illustré dans la figure.

1. Initialisation du vecteur de population

La découverte et la maintenance des chemins multiples s'effectueront constamment à travers trois messages (type RREQ, type RREP, type RERR) et le recours à une table de routage propre à chaque nœud (TR).

- **Message RREQ (RouteRequest)** : Il s'agit d'un message qui est diffusé par un nœud sollicitant un chemin vers une destination.
- **Message RREP (RouteReply)** : Une fois la destination atteinte, celle-ci envoie une confirmation sous forme d'un message RREP, basé sur le niveau énergétique des nœuds qui constituent le chemin.
- **Message RERR (Route Error)** : quand un chemin devient inaccessible, le message de type RERR est transmis jusqu'à la source.

La population initiale comprend tous les chemins enregistrés au départ par le processus de découverte des chemins. Ce processus est initié lorsqu'un coordinateur source de nœud doit envoyer des données à un coordinateur de destination (coordinateur statique), et qu'il n'existe aucun chemin valide dans la table des routes. Il engage alors une procédure de découverte de plusieurs chemins à liens disjoints en diffusant un message de type RREQ dans l'ensemble du réseau. Chaque nœud intermédiaire examine si le message RREQ est dupliqué; seulement un

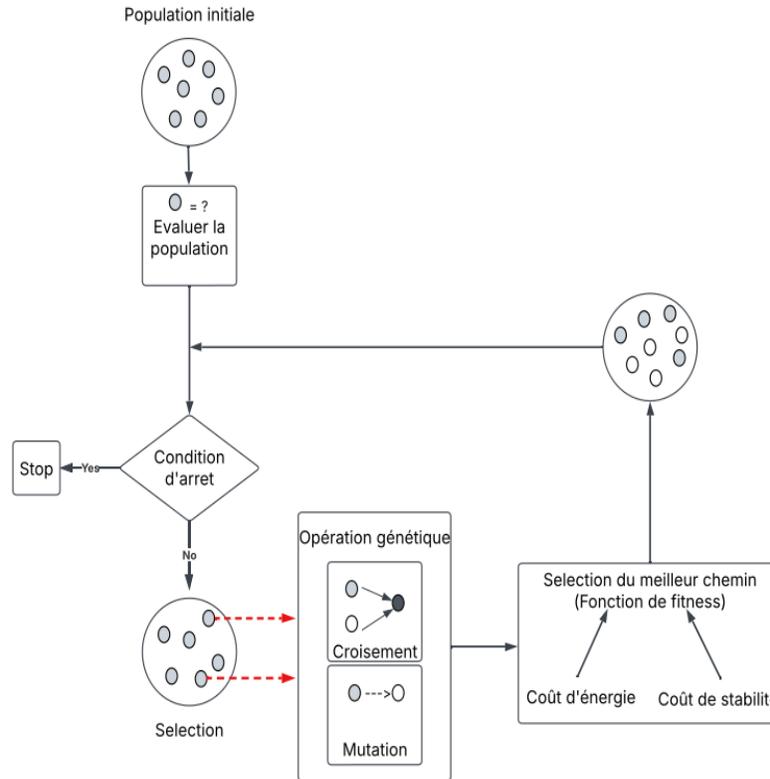


FIG. 7.3 – Algorithme ED conventionnel.

unique message RREQ sera retransmis, tandis que tous les autres messages dupliqués seront rejetés. Si le nœud intermédiaire dispose d'un chemin vers le coordinateur de destination, il transmet un message de type RREP au nœud source. Autrement, il achemine le message de demande de chemin à tous ses voisins. En outre, le nœud intermédiaire enregistre le chemin inverse dans sa table de routage. Cette procédure se poursuit jusqu'à ce que le coordinateur de destination reçoive le message RREQ. À ce stade, le coordinateur de destination insère le chemin et transmet un message de type RREP au nœud source par l'intermédiaire du chemin inverse. Quand le nœud source reçoit le premier message RREP, il déclenche un temps d'attente (timer) pour collecter davantage des messages RREPs, générant ainsi l'ensemble initial des chemins. L'algorithme de découverte des chemins est représenté comme suit (Algorithme 14) :

2. La mutation

Pour notre solution, la mutation est déterminée par trois modifications potentielles avec une probabilité identique : échange d'un nœud, suppression d'un nœud ou insertion d'un nœud. Lors d'un échange de nœuds, le nœud muté (intermédiaire) ne doit pas provenir ou être échangé contre un nœud choisi au hasard. Il doit être inclus dans la table des voisins du nœud qui le précède et le suit. Lorsqu'on veut ajouter ou supprimer un nœud, soit le nœud concerné doit être retiré du chemin si ses nœuds adjacents sont voisins, soit un nouveau nœud doit être inséré et figurer sur la table des voisins du nœud précédent et du nœud suivant. Voici un exemple (Figure 7.4) des trois cas de mutation sur un ensemble de chemins découverts :

Après l'application du processus de mutation à tous les chemins (ou chromosomes), une phase de validation est initiée pour confirmer (ou invalider) les chemins qui en résultent. Le pseudo-code de l'algorithme de mutation est représenté ci-dessous (Algorithme 15) :

3. Le croisement

```

1 Entrée :
2 Une population de nœuds.
3 Sortie :
4 Une liste de chemins entre une source et une destination.
5 début
6   Diffusion d'un message RREQ par le nœud source.
7   répéter
8     si (le nœud Destination n'est pas le récepteur du paquet RREQ) alors
9       Collecter la donnée de la distance entre l'émetteur du RREQ et le
10      récepteur.
11     Diffuser le message RREQ aux voisins directes.
12   fin
13 jusqu'à (Le nœud Destination reçoit le dernier message RREQ);
14 si (le nœud Destination reçoit le dernier message RREQ) alors
15   Le nœud Destination transmet un RREP à tous ces voisins directs suivant les
16   chemins inverses.
17 fin
18 répéter
19   si (le nœud Source n'est pas le récepteur du paquet RREP) alors
20     Collecter la donnée de la distance entre l'émetteur du RREP et le
21     récepteur suivant les chemins inverses.
22   fin
23 jusqu'à (Le nœud Source reçoit le dernier message RREP);
24 Actualiser la liste des chemins.
25 fin
    
```

Algorithme 14 : Algorithme de Découverte des chemins.

Dans cette étape de croisement, nous appliquons un croisement d'un seul nœud commun entre deux chemins issus de l'étape de mutation. Ainsi, il est recommandé de repérer des nœuds communs entre les chemins concernés afin de réaliser l'opération de croisement. Cette méthode de croisement garantit la validité des chemins obtenus et n'exige pas de procédure de contrôle ou de validation. Il convient de souligner que l'opération de croisement ne concerne pas le nœud source et destination. Le pseudo-code de l'opération de croisement est illustré dans l'Algorithme 16 :

4. Sélection du routage du chemin

Cette étape décrit le choix du chemin basé sur la fonction objectif. Le problème de routage est posé comme un problème mathématique multi objectifs, visant à réduire la consommation énergétique tout en garantissant une liaison stable. On définit deux fonctions objectives : la fonction d'énergie et la fonction de stabilité.

(a) Fonction du coût énergétique

Soit $fep_j(t)$ le minimum des valeurs de la fonction de coût énergétique $fe_{i,j}(t)$ pour le chemin j d'un coordinateur source s vers un coordinateur destination d à l'instant t :

$$fep_j(t) = \min_{node_i}^{length(j)} (fe_{i,j}(t)) \quad (7.2)$$

Et soit $fe_{i,j}(t)$:

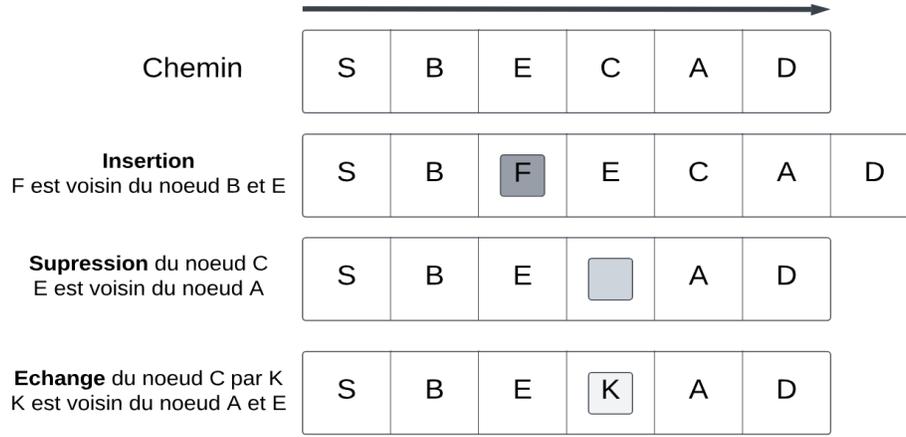


FIG. 7.4 – Exemple d'un processus de mutation.

$$f_{e_{i,j}}(t) = \frac{Elev_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t)} * w_{i,j} \quad (7.3)$$

À l'instant t , le niveau d'énergie du nœud i appartenant au chemin j est noté par $Elev_{i,j}(t)$, défini comme suit :

$$Elev_{i,j}(t) = \frac{E_{i,j}(t)}{Es_{average}} \quad (7.4)$$

$E_{i,j}(t)$ représente l'énergie résiduelle du nœud coordinateur i , qui est un membre du j^{me} chemin au temps t , tandis que $Es_{average}$ représente la moyenne de l'énergie coordinatrice qui a participé au chemin. $w_{i,j}$ est le poids du nœud i , qui est influencé par plusieurs caractéristiques techniques de la batterie. Le débit de drain du nœud i , qui fait partie du chemin j à l'instant t , noté $DR_{i,j}(t)$, est défini comme le taux de consommation d'énergie du nœud, et peut être exploité simultanément par plusieurs chemins.

(b) **Fonction du coût de stabilité de lien**

Afin d'évaluer la stabilité des liaisons dans les réseaux WBANs, nous prenons en compte la mobilité des nœuds comme un critère principal. Dans les protocoles fondés sur la mobilité des nœuds, on recourt à des paramètres de nœuds tels que les coordonnées, les directions de mouvements, les vitesses, etc., pour juger de la stabilité des nœuds. Pour notre solution, nous utilisons les coordonnées du nœud. DERP utilise les messages employés dans le processus de découverte (RREQ et RREP) pour collecter les coordonnées des nœuds voisins, ceci afin d'éviter le surcoût engendré par l'envoi de messages destinés à la collecte d'informations. Lorsqu'un lien entre nœuds i et j sera établi, le nœud i envoie périodiquement des messages au nœud j afin de recueillir les informations sur ses coordonnées, puis de les sauvegarder dans la table des voisins pour évaluer la stabilité du lien. Le nœud i utilise ces données pour déterminer les distances qui le séparent du nœud j , notées $d_{i,j}$. Le coût de stabilité du lien ij est établi comme suit :

$$Fsl_{i,j}(t) = \frac{SDl_{i,j}(t)}{Ml_{i,j}(t)} \quad (7.5)$$

où $Ml_{i,j}(t)$ représente la moyenne des distances accumulées entre les nœuds i et j , calculée par :

```

1  Entrée :
2  Une liste de chemins découverts non Null.
3  Sortie :
4  Une nouvelle liste de chemins.
5  début
6  | tant que (le nombre de chemins > 0) faire
7  |   Choisir un chemin parmi la liste.
8  |   si (la taille d'un chemin < 3) alors
9  |   | Ajouter un nouveau nœud.
10 | sinon
11 |   Choisir aléatoirement un nombre NB compris entre 1 et 3.
12 |   si (NB == 1) alors
13 |   | Ajouter un nouveau nœud.
14 |   fin
15 |   sinon si (NB == 2) alors
16 |   | Supprimer un nouveau existant
17 |   sinon
18 |   | Changer un nœud existant.
19 |   fin
20 | fin
21 fin
22 fin
    
```

Algorithme 15 : Algorithme de mutation.

$$Ml_{i,j}(t) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} d_{i,j}(t)}{n} \quad (7.6)$$

$SDl_{i,j}(t)$ représente l'écart type des distances enregistrées entre les nœuds i et j . Sa formule est exprimée par :

$$SDl_{i,j}(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_1}^{t_n} (d_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t))^2} \quad (7.7)$$

Le coefficient de variation à l'instant t , aussi connu sous le nom d'écart type relatif, est noté par la fonction $fsl_{i,j}(t)$. C'est une mesure standardisée de la dispersion d'une distribution probabiliste ou de fréquence. Pour notre protocole, il s'agit de l'évaluation des distances entre deux nœuds adjacents. Si le coefficient de variation tend vers 0, cela indique une répartition uniforme des distances, signifiant ainsi que le lien est stable. Si le coefficient de variation tend vers 1, cela indique une répartition inadéquate (mauvaise répartition), signifiant que la liaison est instable. La fonction du coût de stabilité du chemin j , appelée $fsp_j(t)$ à l'instant t , correspond au coût de stabilité maximale des liaisons qui composent le chemin j . Elle est définie par :

$$fsp_j(t) = \max_{node_i}^{length(j)} (fsl_{i,j}(t)) \quad (7.8)$$

(c) **Formule de la fonction objectif**

```

1 Entrée :
2 Une liste de chemins enregistrés après la Mutation.
3 Sortie :
4 Une nouvelle liste de chemins.
5 début
6   pour (i allant de 1 à Nbr_chemin) faire
7     chemina=choisir un chemin dont le numéro est i.
8     pour (j allant de i + 1 à Nbr_chemin) faire
9       cheminb =choisir un chemin dont le numéro est j.
10      si (NB == 1) alors
11        Insérer les deux chemins dans une liste rt_croisement avec leur
12        position.
13      fin
14    fin
15    si (la taille du tableau de rt_croisement > 1) alors
16      tant que (la taille de tableau de rt_croisement > 0 ) faire
17        Choisir aléatoirement une ligne dans le tableau des rt_croisement.
18        Maitre à jour Tab_chemin.
19        Supprimer cette ligne.
20        si (le chemin1 ou bien le chemin2 choisi sont répéter Dans le tableau
21          rt_croisement) alors
22          Supprimer la ligne.
23        fin
24      fin
25    sinon
26      Retourner Tab_chemin
27    fin

```

Algorithme 16 : Algorithme de croisement (*Tab_chemin*).

La sélection de chemin s'effectue selon l'ordonnancement des chemins découverts en fonction de la fonction objectif basée sur l'énergie et de la stabilité du lien. La fonction à plusieurs objectifs $fp_j(t)$ est formulée comme suit :

$$fp_j(t) = \alpha fep_j(t) + (1 - \alpha) fsp_j(t) \quad (7.9)$$

Notre proposition consiste à trier tous les chemins entre un nœud coordinateur source et un nœud coordinateur destination en fonction de la valeur décroissante de $fp_j(t)$. On sélectionne le chemin qui a la valeur maximale de $fp_j(t)$ pour la transmission des paquets de données. On note que ce modèle est adaptable à une multitude d'applications à divers objectifs en fonction du choix des valeurs adéquates pour le coefficient α . Par exemple, si une application a besoin de plus d'énergie, un poids élevé est attribué à ($\alpha > (1 - \alpha)$), en faveur des applications qui requièrent des économies d'énergie, étant donné que c'est le coefficient lié à cet objectif. Après la sélection de le chemin optimal, la table de routage sera actualisée. L'algorithme suivant (Algorithme 17) représente un pseudo-code de l'algorithme

de transmission des paquets de données.

```

1 début
2   | si (aucun chemin n'est connue entre un nœud source et destination) alors
3   |   | Initialiser le processus de découverte des chemins.
4   | fin
5   | si (découverte d'une seul chemin) alors
6   |   | Transférer les données sur ce chemin.
7   | sinon si (découverte de plusieurs chemins) alors
8   |   | Choisir le meilleur chemin selon la fonction objectif (équation (7.9)).
9   |   | Transférer les données sur ce chemin.
10  | fin
11 fin
    
```

Algorithme 17 : Algorithme de Transmission des paquets de données.

7.3.3 Procédure de maintenance des chemins du protocole DERP

Quand une rupture de liaison se produit au sein d'un chemin en service (chemin actif), le nœud qui la précède envoie un paquet de type RERR au nœud suivant. Ce processus est réitéré jusqu'à atteindre le nœud source. Une fois que la source reçoit le message d'erreur, elle consulte la table des chemins pour trouver une alternative avec la plus grande valeur $fp_j(t)$ existante. Si aucune n'est trouvée, elle initie une nouvelle procédure de découverte des chemins. L'Algorithme 18 décrit le traitement de la procédure de maintenance d'un chemin.

```

1 début
2   | si (un nœud ne reçoit pas plusieurs paquets HELLO) alors
3   |   | Envoyer un message de type RERR au nœud prédécesseur.
4   | fin
5   | répéter
6   |   | si (le nœud récepteur du message RERR n'est pas la source) alors
7   |   |   | Diffuser le message RERR.
8   |   | fin
9   | jusqu'à (Réception du message RERR par la source);
10  | Transmission des paquets de données.
11 fin
    
```

Algorithme 18 : Algorithme de maintenance des chemins.

7.4 Évaluation des performances du protocole DERP

Dans cette partie, nous présentons les mesures employées pour évaluer la performance de notre solution de routage DERP par rapport au protocole EPR [169]. EPR est un protocole de routage destiné pour à réseau corporel (BAN) dans les milieux hospitaliers intérieurs. Cette solution intègre un mécanisme innovant de détection de paires et d'élaboration d'une table de routage qui contribue à minimiser le trafic réseau, la consommation énergétique tout en renforçant la fiabilité du BAN. Le

schéma suggéré fait appel à des méthodes centralisées et distribuées. Uniquement le serveur principal possède les données relatives aux BANs et aux unités d'affichage, ce qui participe à renforcer la confidentialité et à optimiser la gestion des communications BAN. L'évaluation est accompagnée d'une analyse et d'une discussion des résultats.

7.4.1 Environnement et paramètres de simulation

L'évaluation d'un protocole de routage conçu pour un réseau WBAN peut présenter des variations significatives en termes de performances, selon le type de modèle de mobilité utilisé. Ainsi, l'évaluation de la performance doit se faire avec un modèle de mobilité qui reflète le mieux la réalité. Nous avons choisi le modèle de mobilité RandomWayPoint (RWP) [84], qui est fréquemment utilisé dans les simulations des réseaux sans fil mobiles. L'évaluation des protocoles simulés se fait selon trois critères de performances :

1. **Le taux de livraison de paquets (PDR)** : représente le rapport entre les paquets de données qui ont été reçus par le nœud de destination et ceux qui ont été générés par le nœud source.
2. **La consommation d'énergie** : correspond à la moyenne de l'énergie absorbée par les nœuds impliqués dans le processus de transfert des paquets du nœud source vers le nœud de destination.
3. **Overhead** : elle est mesurée en comptant le nombre de messages de contrôle envoyés à chaque nœud durant la simulation.

Les simulations ont été effectuées à l'aide du simulateur Matlab. Nous supposons que tous les nœuds du réseau sont équipés par des interfaces de communication sans fil IEEE 802.15.6. Nous avons réalisé 20 simulations pour chaque scénario. Le trafic *CBR* est utilisé pour modéliser la communication entre les nœuds du réseau. L'énergie résiduelle de chaque nœud est prise aléatoirement entre 10 et 50 joules. On suppose que l'énergie consommée par un nœud lors de la réception d'un paquet est de 12.84 dBm, ou lors de la transmission est égale à 13.80 dBm. La consommation d'énergie en mode inactif est ignorée. Les nœuds se déplacent à une vitesse qui atteint au maximum 3 m/s. La table suivante (Tableau 7.1) résume les paramètres de simulation.

Paramètre	Valeur
Simulateur	Matlab
Type MAC	IEEE 802.15.6
Modèle de mobilité	Random WayPoint
Surface de simulation	100m x 100m
Durée de simulation	250s
Nombre des nœuds	20
Portée radio	10m
Vitesse Maximale	3m/s
Puissance d'émission/réception	13.80dBm – 12.84dBm
Taille du paquet	32bits
Timer	0.3s
Drain Rate	10% – 50%
α	0.5

TAB. 7.1 – Paramètres de simulation du protocole DERP.

7.4.2 Résultats de simulation et discussion

1. PDR (Packet Delivery Ratio)

La Figure 7.5 présente le taux de livraison des paquets en fonction de différentes vitesses de déplacement des nœuds. Il en ressort que le protocole DERP surpasse nettement EPR en termes de fiabilité, avec un nombre plus élevé de paquets reçus avec succès, même dans des conditions de mobilité aléatoire. Cette amélioration significative est directement liée à l'utilisation de la méthode bio-inspirée d'évolution différentielle, qui permet une exploration efficace de l'espace des chemins possibles pour identifier les chemins optimaux. En intégrant les contraintes d'énergie résiduelle des nœuds et de stabilité des liaisons dans le processus de sélection, DERP est capable de choisir dynamiquement les chemins les plus robustes et les plus durables. Cela a pour effet de réduire les coupures de liens, de limiter les pertes de paquets, et de maintenir un taux de livraison élevé, garantissant ainsi une communication fiable et continue dans les réseaux WBAN soumis à des variations fréquentes de topologie.

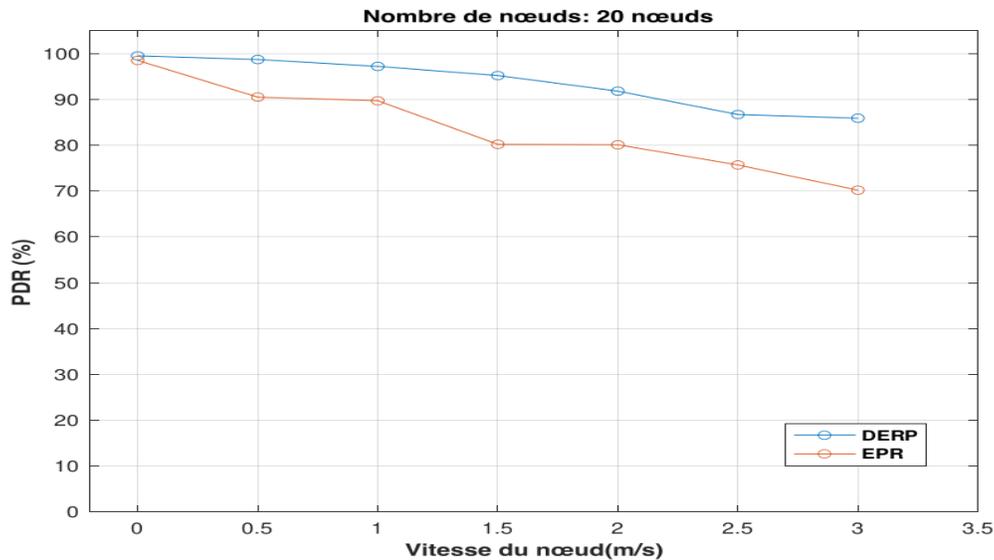


FIG. 7.5 – Le PDR vs La vitesse des nœuds.

2. Énergie consommée

La Figure 7.6 illustre la consommation énergétique comparée des protocoles DERP et EPR sous le modèle de mobilité Random Waypoint (RWP). Comme le montre la courbe, le protocole DERP consomme significativement moins d'énergie que le protocole EPR. Par exemple, lorsque la vitesse des nœuds atteint 1,5 m/s, la consommation énergétique moyenne du protocole DERP est inférieure d'environ 55% par rapport à celle du protocole EPR.

L'utilisation de la méthode bio-inspirée d'évolution différentielle (DE) joue un rôle clé dans cette optimisation. Grâce à ses capacités à explorer efficacement l'espace de recherche des chemins possibles, le protocole permet de sélectionner dynamiquement les chemins qui maximisent la stabilité des liens tout en minimisant la consommation énergétique. Elle permet également d'adapter en temps réel les décisions de routage en fonction des conditions changeantes du réseau, ce qui renforce la robustesse et l'efficacité globale du protocole DERP.

3. Overhead

La Figure 7.7 illustre le taux de charge induit par le trafic de routage pour les protocoles DERP et EPR sous le modèle de mobilité RWP. Il apparaît clairement que DERP génère un volume de paquets de contrôle nettement inférieur à celui du protocole EPR. Cette réduction significative

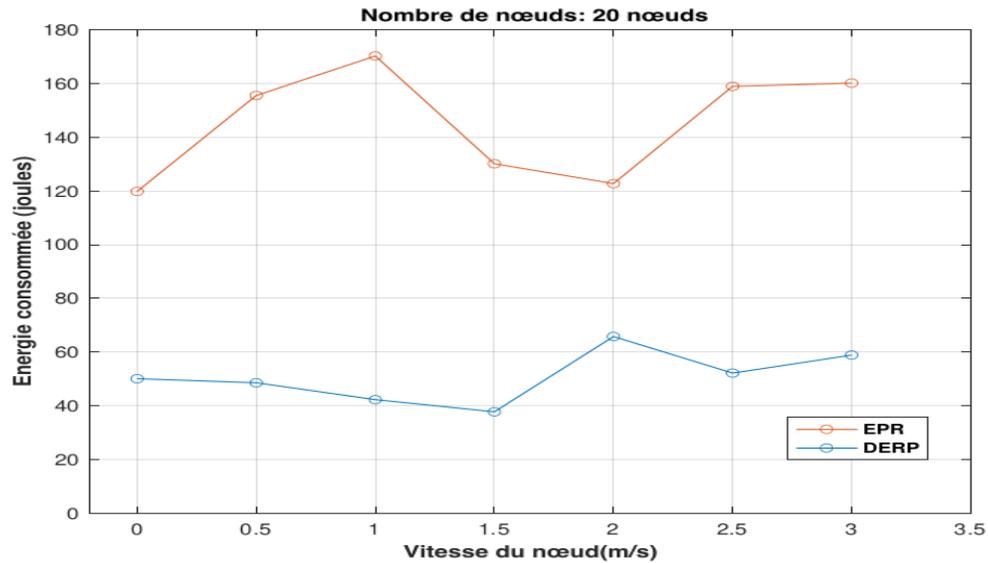


FIG. 7.6 – La consommation d’énergie vs La vitesse des nœuds.

de l’overhead est attribuable à l’approche bio-inspirée d’évolution différentielle intégrée dans DERP, qui permet une sélection intelligente et proactive des chemins. En évaluant les chemins potentiels selon des critères de stabilité des liens et d’énergie résiduelle, DERP identifie non seulement le meilleur chemin principal, mais anticipe également des chemins alternatifs en cas de défaillance. Ce mécanisme limite la fréquence des redécouvertes des chemins et des échanges de messages de contrôle, contribuant ainsi à alléger la charge réseau. En conséquence, DERP optimise l’utilisation des ressources en minimisant le trafic de routage, ce qui se traduit par une amélioration globale de l’efficacité du protocole, même en environnement dynamique.

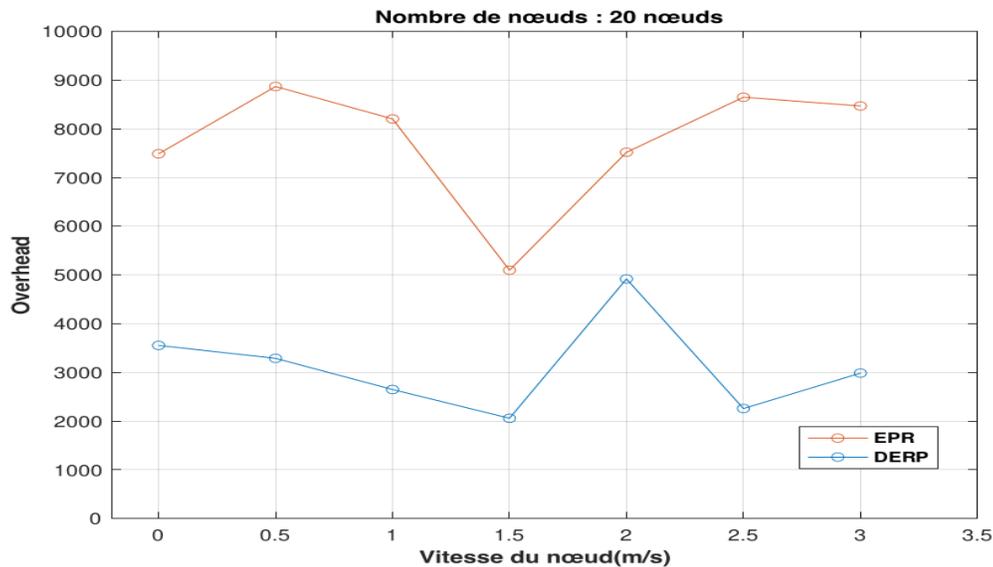


FIG. 7.7 – Overhead vs La vitesse des nœuds.

4. Discussion

Nous avons suggéré pour les réseaux WABNs un protocole de routage multi-chemins DERP, qui

repose sur deux contraintes principales : la stabilité des liens et l'énergie des nœuds. Après le processus de découverte des chemins, notre protocole examine les nouveaux chemins issus de la méthode bio-inspirée évolution différentielle et sélectionne celle qui garantit une stabilité optimale, tout en offrant une capacité énergétique maximale (des nœuds constituant cet chemin). Cette approche nous aide à prolonger la longévité du chemin, à diminuer le nombre d'interruptions en évitant d'une part les liaisons instables qui pourraient mener à des coupures fréquentes et d'autre part les nœuds épuisés qui seront dysfonctionnels. Le protocole DERP a été évalué dans un modèle de mobilité aléatoire ; les résultats des simulations indiquent que cette solution est plus performante en matière d'économie d'énergie grâce à une gestion efficace, ce qui améliore la longévité du chemin et du réseau WBAN.

7.5 Conclusion

Dans cette dernière contribution, nous avons apporté une solution aux problèmes de routage dans les réseaux WBANs, qui sont caractérisés par leur dynamisme où les pannes de liaison et les ruptures de chemins se produisent fréquemment. Un nouveau protocole de routage multi-chemins, DERP (Differential Evolution based Routing Protocol for wireless body area networks), a été proposé pour améliorer la fiabilité du réseau et réduire la consommation d'énergie. DERP utilise un algorithme bio-inspiré nommé évolution différentielle pour trouver le chemin optimal d'un nœud source à un nœud de destination. Le choix du chemin dépend d'une fonction de fitness avec deux objectifs. L'énergie du nœud et la stabilité du lien sont utilisées pour calculer cette fonction. Des chemins alternatifs sont pré-calculés puis utilisés chaque fois qu'il y a une panne de liaison d'un chemin. Grâce à l'évaluation des performances, nous avons remarqué que notre protocole améliorerait les performances du réseau WBAN par rapport aux autres protocoles de routage de la littérature.

Chapitre 8

Conclusion et perspectives

Contents

8.1 Conclusion	155
8.2 Perspectives	157

8.1 Conclusion

À l'heure actuelle, la plupart des appareils possèdent une interface sans fil qui exploite la flexibilité offerte par les réseaux sans fil, garantissant une communication à tout moment et depuis n'importe où. En outre, l'apparition des applications mobiles est un autre facteur qui requiert l'usage des réseaux sans fil. Un réseau sans fil peut être soit avec infrastructure, constitué d'un ensemble de bases connectées par un réseau filaire, et l'emploi du réseau sans fil est restreint à la dernière zone (entre le consommateur final et la base), soit sans infrastructure, où aucune connexion filaire n'est mise en place (entièrement sans fil, c'est-à-dire, un réseau mobile sans fil ou ad hoc).

Ces réseaux ad hoc, dits aussi MANETs présentent plusieurs avantages : mise en place rapide, coût réduit, mobilité, etc. Néanmoins, il se distingue par des ressources limitées au niveau des nœuds (en termes d'énergie, de mémoire et de puissance de calcul) ainsi que par une topologie qui change rapidement.

Étant donné la nature et les propriétés des réseaux mobiles sans fil, les protocoles de routage classiques utilisés pour les réseaux filaires ne conviennent pas pour les réseaux ad hoc. Le routage dans un réseau ad hoc représente donc un défi considérable, nécessitant une adaptation constante du protocole de routage aux diverses caractéristiques : les changements fréquents de la topologie, les capacités restreintes en termes de calcul et de stockage des nœuds, la consommation d'énergie, la qualité du signal ainsi que la bande passante limitée. Dans ce cadre, plusieurs protocoles de routage ont été suggérés, en se basant sur le nombre de sauts comme critère de sélection des chemins. Néanmoins, il a été démontré que cette approche n'est pas la plus judicieuse, car elle néglige toutes les conditions qui influencent la fiabilité de la transmission.

Les protocoles de routage dans les réseaux MANETS peuvent découvrir un seul chemin ou plusieurs chemins. Le routage à multiples chemins est en mesure d'identifier divers chemins, contrairement au routage à voie unique. Les chemins multiples peuvent être à liens distincts (les chemins peuvent partager des nœuds) ou à nœuds distincts. Le routage multi-chemins offre une réponse performante à diverses problématiques : la résilience aux défaillances, la congestion et la répartition de la charge.

La contrainte d'énergie est l'une des limitations majeures dans les réseaux MANETs. Dans ce type de réseaux, les nœuds possèdent une source d'énergie limitée (des batteries) qui va s'épuiser au fil du temps. Tout nœud qui a épuisé son énergie devient défectueux et se retire immédiatement du réseau. Ainsi, il n'est plus intégré au réseau et il lui est impossible d'envoyer ou de recevoir des messages, ce qui peut entraîner des interruptions sur les chemins traversant ce nœud. Une gestion inefficace de l'énergie par le protocole de routage peut gravement impacter la performance du réseau, car l'accroissement du nombre de nœuds quittant le réseau entraînera des zones entièrement isolées. Par ailleurs, chaque interruption engendre un nouveau processus de recherche de chemins qui dépense davantage d'énergie et entraîne un retard dans le rétablissement de la communication. L'objectif primordial de la considération de l'énergie est d'étendre la longévité des nœuds et du réseau.

La contrainte de stabilité est une autre contrainte cruciale qui peut engendrer davantage de complications. Dans un réseau ad hoc, la mobilité des nœuds entraîne une modification régulière de la topologie du réseau, certains liens devenant non fonctionnels (perdus) tandis que d'autres sont établis en raison de la portée limitée des nœuds. Cette modification entraîne des interruptions de chemins qui, à chaque arrêt, déclenchent le processus de découverte, consomment davantage d'énergie et augmentent le pourcentage de paquets perdus, étant donné que l'interruption n'est pas détectée en temps réel (un lien est jugé perdu si un nœud ne reçoit aucun message de contrôle d'un nœud voisin dans un laps de temps donné). Ainsi, en présence de coupures fréquentes, on peut observer une détérioration significative de la performance du réseau. En tenant compte de la stabilité, on sélectionne le chemin le plus stable pour prolonger sa longévité, économiser les ressources du réseau (telles que l'énergie et la bande passante) et garantir une transmission sûre.

Les méthodes bio-inspirées ont gagné en popularité dans le domaine du routage des réseaux sans fil en raison de leur capacité à s'adapter à des environnements dynamiques, incertains et distribués. Ces techniques exploitent des stratégies naturelles observées chez les organismes vivants pour résoudre des problèmes complexes de communication et d'optimisation. Les algorithmes bio-inspirés apportent des avantages notables, tels que leur capacité à s'adapter dynamiquement aux variations des conditions du réseau sans nécessiter une connaissance globale de l'état du système. De plus, leur nature distribuée et autonome permet une gestion robuste des défaillances de liens et de la mobilité des nœuds dans des réseaux ad hoc ou sans infrastructure fixe. Les systèmes bio-inspirés permettent également une gestion plus efficace de l'énergie, ce qui est crucial dans les réseaux sans fil, notamment pour les dispositifs alimentés par batterie.

Au cours des dernières années, les études se sont orientées vers un routage multi-objectif à base de méthodes bio-inspirées pour garantir une transmission fiable et optimiser les performances des réseaux. Le but de notre recherche doctorale est l'élaboration d'un protocole de routage multi-chemins fiable et stable destiné aux réseaux mobiles sans fil sans infrastructure (MANETs, FANETs ou WBANs). Dans un premier temps, nous avons présenté quelques notions de base sur les réseaux sans fil, ensuite nous avons réalisé une étude sur les protocoles de routage présents dans la littérature, en fournissant la classification des divers protocoles de routage en fonction du principe de découverte et de la structure du réseau, puis nous avons discuté les trois contraintes : énergie, stabilité et qualité, en citant quelques protocoles de routage récents basés sur une seule ou plusieurs contraintes telles que l'énergie, la stabilité, la qualité, etc. En second lieu, nous avons présenté les méthodes bio-inspirées pour la résolution des problèmes complexes, d'où nous discutons de leur efficacité et puissance à résoudre ces problèmes. Ensuite, nous avons cité quelques méthodes bio-inspirées de la littérature visant la résolution du problème de routage dans les réseaux ad hoc.

Notre première contribution est une solution de routage multi-chemins SDERP (stable-aware differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks), qui repose sur l'implémentation d'une méthode bio-inspirée évolution différentielle et sur une intégration d'une fonction objective basée sur deux critères : la stabilité des liens et l'énergie des nœuds. SDERP se fonde sur

le protocole de base AOMDV, qui facilite la recherche de trajets à liens distincts entre un nœud source et un nœud destination. De manière périodique, chaque nœud évalue la stabilité des liens de ses voisins en tenant compte de leur mobilité (le changement de distance). Au cours de la découverte des chemins, on évalue pour chaque chemin le coût de stabilité qui correspond à la valeur maximale de stabilité des liens constituant le chemin et à l'énergie minimale de cette dernière (tenant compte de l'énergie résiduelle et du taux d'utilisation). Au terme du processus de découverte, l'algorithme bio-inspiré évolution différentielle (ED) sera lancé par la source pour découvrir de nouveaux chemins valides depuis la source vers la destination. Ces chemins seront classés par la source selon leur fonction objective. Le modèle de mobilité RWP a servi de base aux simulations réalisées sur le simulateur NS2. Les données indiquent que ce protocole est moins énergivore et optimise le taux d'acheminement des paquets de données. Une deuxième contribution de routage ES-RPDE (energy aware and link-stability routing protocol based on differential evolution for MANETs) est réalisée pour les réseaux ad hoc qui se base sur le même principe que le protocole SDERP. L'algorithme d'évolution différentielle est déclenché au niveau du nœud destination. Une fois terminé, les nouveaux chemins seront transmis avec leur valeur de fonction de fitness vers le nœud source, qui sera chargé de choisir le meilleur chemin optimal. Le meilleur chemin est celui qui a une valeur maximale de la fonction de fitness qui combine les deux contraintes de stabilité et d'énergie. L'évaluation a démontré que le protocole ES-RPDE consomme moins d'énergie, améliore le taux de transmission de paquets et diminue le flux de contrôle généré.

Notre troisième contribution est un protocole de routage multi-chemins SE-RPCS (energy-aware and stability multipath routing protocol based on the cuckoo search algorithm for FANETs) conçu pour un mouvement en trois dimensions dans les réseaux FANETs. SE-RPCS est une amélioration du protocole de routage multi-chemins AOMDV par l'intégration de la méthode de recherche Coucou (CS). Le drone source sélectionnera le meilleur chemin parmi ceux qui sont déduits après la fin de la méthode bio-inspirée CS en se basant sur la contrainte de stabilité des liens entre les drones et celle d'énergie des drones. L'évaluation du protocole a prouvé que notre solution a permis d'éviter les chemins instables, ce qui assure une transmission fiable et efficace des données dans le réseau.

Notre dernière contribution est une solution de routage réactif multi-chemins basée sur la contrainte de stabilité et d'énergie pour les réseaux corporels sans fil WBANs, nommée DERP. Le protocole DERP est une combinaison du protocole de routage AOMDV et d'une méthode bio-inspirée ED. Ce protocole classe les meilleurs chemins valides issus après la fin de la méthode bio-inspirée ED selon une fonction multi objective à deux contraintes : stabilité des liens et énergie des nœuds. Le protocole DERP a été implémenté et évalué en utilisant l'outil MATLAB. Les résultats fournis par le biais de la simulation prouvent que cette solution offre une meilleure consommation d'énergie, réduit le trafic de contrôle et assure une meilleure fiabilité de données dans les communications WBANs.

8.2 Perspectives

Enfin, dans une démarche conjointe d'amélioration des approches suggérées et de continuité d'un travail débuté, nous envisageons la proposition des perspectives suivantes :

1. Nos contributions reposent avant tout sur un processus minutieux de sélection et d'évaluation des chemins, en tenant compte de multiples contraintes. Ce processus ne se limite pas seulement à la découverte des chemins, mais intègre également une approche proactive pour anticiper et optimiser la construction des chemins dès le début. En concevant les chemins de manière stratégique, nous veillons à prendre en considération un large éventail de critères tels que la stabilité des liens, la qualité des liens, ainsi que d'autres facteurs déterminants comme le débit de transmission. Cette approche holistique permet de choisir les chemins les plus adaptés non seulement

à court terme, mais aussi en tenant compte des variations dynamiques du réseau, garantissant ainsi une performance optimisée et une robustesse accrue du réseau dans des environnements mobiles et changeants.

2. Une extension importante de cette recherche serait d'implémenter les protocoles de routage proposés pour d'autres type de réseaux (par exemple : les réseaux VANETs, les réseaux SANETs), afin d'évaluer leur adaptabilité dans des environnements présentant des caractéristiques de mobilité et de densité différentes. Ces réseaux, qui sont fortement influencés par la mobilité élevée des nœuds et des densités variables, offrent des défis uniques en matière de gestion du routage. Une étude plus approfondie serait nécessaire pour analyser comment ces protocoles peuvent maintenir leur efficacité dans des scénarios où la topologie du réseau change rapidement. En plus, il serait pertinent d'explorer l'implémentation des protocoles dans d'autres modèles de mobilité, tels que le modèle ManhattanGrid, qui simule des environnements urbains avec des déplacements en grille. Ce modèle présente une structure de mobilité différente de celle observée dans les réseaux MANETs, ce qui pourrait influencer la façon dont les chemins sont sélectionnés et évalués en fonction de la stabilité des liens, de l'énergie des nœuds, et d'autres critères de performance comme la qualité des liens, la bande passante résiduelle, etc. L'adaptabilité des protocoles dans ces modèles pourrait fournir de nouvelles perspectives sur leur robustesse et leur scalabilité dans des environnements plus complexes.
3. Un axe de recherche futur intéressant serait d'intégrer des mécanismes de tolérance aux pannes plus robustes dans nos solutions de routage. Cela pourrait inclure l'implémentation de processus de maintenance dynamique capables de détecter rapidement les pannes des chemins et de rétablir automatiquement la connectivité. Étant donné que même les chemins alternatifs peuvent être invalidés dans des environnements à haute mobilité, il serait crucial de développer des stratégies permettant de réagir rapidement aux ruptures de liens et de garantir la reconfiguration efficace du réseau pour maintenir une connectivité stable et optimale.
4. Une direction intéressante pour les recherches futures serait d'explorer l'application d'autres méthodes bio-inspirées dans le processus de découverte et de sélection des chemins. Des algorithmes tels que l'algorithme des abeilles, la colonie de fourmis représentent des approches prometteuses pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation dans le contexte du routage. Ces algorithmes, en imitant des comportements naturels efficaces, pourraient offrir des solutions innovantes pour surmonter les défis rencontrés dans les réseaux ad hoc, en permettant de trouver le chemin optimal tout en s'adaptant aux conditions changeantes du réseau et aux exigences de performance.
5. Un autre axe de recherche prometteur serait le passage vers l'intelligence artificielle (IA), en particulier l'utilisation de l'apprentissage automatique (ML) pour optimiser dynamiquement les paramètres des méta-heuristiques, comme le réglage des poids des critères dans le processus de sélection des chemins. Cette approche permettrait d'adapter les algorithmes de routage en fonction des conditions changeantes du réseau, afin de maximiser leur performance. En outre, l'exploration de l'apprentissage par renforcement (RL) pour un routage adaptatif en temps réel pourrait permettre aux protocoles de s'ajuster de manière autonome et continue en fonction des variations des réseaux, garantissant ainsi des décisions de routage optimales en fonction des situations actuelles des réseaux sans fil mobiles.

Table des figures

1.1	Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture.	2
1.2	Exemple d'un réseau cellulaire.	3
1.3	Exemple d'un réseau ad hoc.	4
1.4	Mode de communication dans un réseau sans fil.	4
2.1	Taxonomie des protocoles de routage.	17
2.2	Structure du paquet RREQ du protocole AODV.	20
2.3	Processus de découverte des chemins (AODV).	20
2.4	Types de chemins multiples.	24
2.5	Structure de la table de routage (AOMDV).	26
2.6	Exemple de processus de découverte des chemins (AOMDV).	27
2.7	Structure de la table de routage (MDSDV).	28
2.8	Mode de consommation d'énergie d'un nœud sans fil.	31
2.9	Modèles de mobilité.	36
2.10	Carte de Manhattan.	39
2.11	Classification de l'estimateur LQE.	40
3.1	Passage d'un phénomène naturel à un algorithme bio-inspiré.	46
3.2	Taxonomie des algorithmes bio-inspirés.	47
3.3	Organigramme générale d'une méthode évolutionnaire.	48
3.4	Principe de l'algorithme d'évolution différentielle.	51
3.5	Illustration du disposition de l'expérience.	53
3.6	Règles de comportements du Phénomène : vol d'oiseaux.	55
3.7	Mouvement d'une particule.	56
3.8	Cycle de vie d'un éléphant.	58
3.9	Organigramme de l'algorithme bio-inspiré IWO.	68
4.1	Exemple illustratif d'un réseau MANET.	76
4.2	Espace de recherche dans un problème d'optimisation.	77
4.3	Organigramme du protocole AOMDV-GA.	81
4.4	Principe de fonctionnement du protocole PESR.	84
5.1	Entrée de la table de routage SDERP.	104
5.2	Structure de la liste de chemins de SDERP.	105
5.3	Organigramme du protocole de routage SDERP.	108
5.4	Le PDR vs La vitesse des nœuds.	111
5.5	La consommation d'énergie vs La vitesse des nœuds.	112
5.6	Overhead vs La vitesse des nœuds.	113
5.7	Le délai de bout en bout vs La vitesse des nœuds.	114

5.8	Étapes du protocole de routage ES-RPDE.	115
5.9	Structure du nouveau paquet RREP.	116
5.10	Structure de la table de voisinage du protocole ES-RPDE.	116
5.11	Le PDR vs La vitesse des nœuds.	119
5.12	La consommation d'énergie vs La vitesse des nœuds.	120
5.13	Overhead vs La vitesse des nœuds.	121
6.1	(a) Drone à voile fixe. (b) Drone à voile tournante.	125
6.2	Architecture modulaire d'un drone.	126
6.3	Types d'architecture de communication dans un réseau FANET.	127
6.4	Structure du nouveau message Hello.	130
6.5	Structure du nouveau message RREQ.	131
6.6	Structure du nouveau message RREQ.	131
6.7	PDR vs La vitesse des drones.	137
6.8	Overhead vs La vitesse des drones.	138
7.1	Architecture d'un réseau WBAN.	141
7.2	Structure de la table des voisins.	143
7.3	Algorithme ED conventionnel.	144
7.4	Exemple d'un processus de mutation.	146
7.5	Le PDR vs La vitesse des nœuds.	151
7.6	La consommation d'énergie vs La vitesse des nœuds.	152
7.7	Overhead vs La vitesse des nœuds.	152

Liste des tableaux

2.1	Analyse comparative entre les protocoles proactif, réactif et hybride.	21
3.1	Analyse comparative entre les types de méthodes bio-inspirées.	70
4.1	Performance des protocoles bio-inspirés analysés dans le cadre de cette thèse	92
5.1	Tableau de notation.	100
5.2	Paramètres de simulation du protocole SDERP.	109
5.3	Paramètres de simulation du protocole ES-RPDE.	118
6.1	Paramètres de simulation du protocole SE-RPCS.	136
7.1	Paramètres de simulation du protocole DERP.	150

Bibliographie

- [1] Kamel Saddiki. *Denial of services attack in wireless networks*. PhD thesis, University Djillali liabes of Sidi Bel Abbes, 2019. (*Cf. p. 2.*)
- [2] Salwa Othmen, Faouzi Zarai, Aymen Belghith, and Lotfi Kamoun. Energy, load, and qos-aware routing protocol for ad hoc networks. In *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pages 886–891. IEEE, 2016. (*Cf. p. 2.*)
- [3] Houda Labiod and Hossam Affi. *De Bluetooth à Wi-Fi*. Hermes science publications, 2004. (*Cf. p. 2.*)
- [4] Philippe Atelin. *Wi-Fi : réseaux sans fil 802.11: Technologie-Déploiement-Sécurisation*. Editions ENI, 2008. (*Cf. p. 2.*)
- [5] Eddy Cizeron. *Routage multichemins et codage à description multiple dans les réseaux ad hoc*. PhD thesis, Université de Nantes, 2009. (*Cf. pp. 2, 23.*)
- [6] Neeraj Chhabra. Comparative analysis of different wireless technologies. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*, 1(5) :13–17, 2013. (*Cf. p. 2.*)
- [7] Giuseppe Anastasi, Luciano Lenzini, and Enzo Mingozzi. Hiperlan/1 mac protocol : stability and performance analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(9) :1787–1798, 2000. (*Cf. p. 2.*)
- [8] Jean-Pierre Chanet. *Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri-environnementaux*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2007. (*Cf. p. 3.*)
- [9] Gueziz Safia. *Contribution à la simulation et l’émulation des Réseaux sans fil de dernière génération*. PhD thesis, Université KASDI MERBAH Ouargla. (*Cf. p. 3.*)
- [10] Romain Pujol. *Association des utilisateurs dans les réseaux mobiles flexibles et agiles*. PhD thesis, Université de Lyon, 2022. (*Cf. p. 3.*)
- [11] Maqbol Ahmed. Une approche agent mobile pour la qos dans les réseaux mobiles ad hoc. *Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider Biskra*, 2010. (*Cf. p. 3.*)
- [12] Mohamed Benmohammed and Saloua Chettibi. Protocole de routage avec prise en compte de la consommation d’énergie pour les réseaux mobiles ad-hoc. (*Cf. p. 3.*)
- [13] Rémi Badonnel. *Supervision des Réseaux et Services Ad-Hoc*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2006. (*Cf. p. 4.*)

- [14] Omar Smail. *Routage multipath dans les réseaux ad hoc*. PhD thesis, Université mohamed boudiaf des sciences et de la technologie d'oran, 2014. (Cf. pp. 5, 18, 23, 33.)
- [15] Sahnoune Zaidi and Boukhechem Nadhir. Routage dans les réseaux mobiles ad hoc par une approche à base d'agents. (Cf. pp. 5, 19.)
- [16] Marco Conti and Silvia Giordano. Multihop ad hoc networking : the evolutionary path. *Mobile Ad Hoc Networking : Cutting Edge Directions*, 35:1–33, 2013. (Cf. pp. 5, 23.)
- [17] JA Guerrero-Ibáñez, C Flores-Cortés, and Sherali Zeadally. Vehicular ad-hoc networks (vanets) : architecture, protocols and applications. In *Next-Generation Wireless Technologies : 4G and Beyond*, pages 49–70. Springer, 2013. (Cf. p. 6.)
- [18] Ozgur Koray Sahingoz. Networking models in flying ad-hoc networks (fanets) : Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74:513–527, 2014. (Cf. p. 6.)
- [19] Ilker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, and Şamil Temel. Flying ad-hoc networks (fanets) : A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3) :1254–1270, 2013. (Cf. p. 6.)
- [20] Shalli Rani, Syed Hassan Ahmed, Jyoteesh Malhotra, and Rajneesh Talwar. Energy efficient chain based routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 92:42–50, 2017. (Cf. p. 6.)
- [21] Rani Kumari and Parma Nand. Performance comparison of various routing protocols in wsn and wban. In *2016 International conference on computing, communication and automation (ICCCA)*, pages 427–431. IEEE, 2016. (Cf. p. 7.)
- [22] Silvia Giordano and Alessandro Urpi. Self-organized and cooperative ad hoc networking. *Mobile Ad Hoc Networking*, pages 355–371, 2004. (Cf. pp. 7, 8.)
- [23] Saleh Ali K Al-Omari and Putra Sumari. An overview of mobile ad hoc networks for the existing protocols and applications. *arXiv preprint arXiv :1003.3565*, 2010. (Cf. p. 7.)
- [24] Abdelkader Mekkaoui, Omar Smail, and Mohammed Rebbah. Sderp : Stable-aware differential evolution-based routing protocol for mobile wireless networks. *International Journal of Communication Systems*, page e6000. (Cf. pp. 10, 98.)
- [25] Abdelkader Mekkaoui, Omar Smail, and Mohammed Rebbah. Energy aware and link-stability routing protocol based on differential evolution for manets. In *2024 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*, pages 66–71. IEEE, 2024. (Cf. pp. 10, 114.)
- [26] Abdelkader Mekkaoui, Omar Smail, and Mohammed Rebbah. Energy aware and stability multipath routing protocol based on the cuckoo search algorithm for fanets. In *International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, pages 493–503. Springer, 2024. (Cf. p. 10.)
- [27] Omar Smail, Soltani Kaouther, and Mekkaoui Abdelkader. Derp : Differential evolution based routing protocol for wireless body area networks. *Journal of Information Science and Engineering*, 41(3) :613–625, 2025. (Cf. pp. 11, 142.)
- [28] Vu Khanh Quy, Vi Hoai Nam, Dao Manh Linh, and Le Anh Ngoc. Routing algorithms for manet-iot networks : a comprehensive survey. *Wireless Personal Communications*, 125(4) :3501–3525, 2022. (Cf. p. 16.)

-
- [29] Dinesh Ramphull, Avinash Mungur, Sheeba Armoogum, and Sameerchand Pudaruth. A review of mobile ad hoc network (manet) protocols and their applications. In *2021 5th international conference on intelligent computing and control systems (ICICCS)*, pages 204–211. IEEE, 2021. (Cf. p. 16.)
- [30] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8) :102–114, 2002. (Cf. p. 17.)
- [31] Chahra Lalaoua. *Probleme de securite dans les reseaux mobiles ad hoc*. PhD thesis, Université Larbi-Tébessi. Tebessa, 2012. (Cf. p. 17.)
- [32] Sabrine Naimi. *Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage*. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI ; École nationale d’ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2015. (Cf. p. 18.)
- [33] Thomas H Cormen, Charles E Leiserson, Ronald L Rivest, and Clifford Stein. *Introduction to algorithms*. MIT press, 2022. (Cf. p. 18.)
- [34] Philippe Jacquet, Paul Muhlethaler, Thomas Clausen, Anis Laouiti, Amir Qayyum, and Laurent Viennot. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. In *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century.*, pages 62–68. IEEE, 2001. (Cf. p. 18.)
- [35] Dimitri Bertsekas. Robert gallager,”. *Data Networks.(2nd edition)*,” Prentice Hall, 1992. (Cf. p. 18.)
- [36] Charles E Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM computer communication review*, 24(4) :234–244, 1994. (Cf. p. 18.)
- [37] David B Johnson, David A Maltz, Josh Broch, et al. Dsr : The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. *Ad hoc networking*, 5(1) :139–172, 2001. (Cf. p. 19.)
- [38] Ait-Salem Boussad. *Sécurisation des Réseaux Ad hoc : Systèmes de Confiance et de Détection de Répliques*. PhD thesis, Université de Limoges, 2011. (Cf. p. 19.)
- [39] Sung-Ju Lee, Elizabeth M Belding-Royer, and Charles E Perkins. Ad hoc on-demand distance-vector routing scalability. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(3) :94–95, 2002. (Cf. pp. 19, 20.)
- [40] Saloua Chettibi. Protocole de routage avec prise en compte de la consommation d’énergie pour les réseaux mobiles ad-hoc. *Mémoire de Magister, Université de Mentouri Constantine*, 2008. (Cf. p. 21.)
- [41] Zygmunt Haas. The zone routing protocol (zrp) for ad hoc networks. *Internet Draft draft-zone-routing-protocol-01.txt*, 1998. (Cf. p. 21.)
- [42] Zygmunt J Haas and Marc R Pearlman. The performance of query control schemes for the zone routing protocol. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 28(4) :167–177, 1998. (Cf. p. 21.)

-
- [43] Nicklas Beijar. Zone routing protocol (zrp). *Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland*, 9(1) :12, 2002. (Cf. p. 21.)
- [44] Aastha Mishra, Shweta Singh, and Arun Kumar Tripathi. Comparison of manet routing protocols. *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput*, 8:67–74, 2019. (Cf. p. 21.)
- [45] Mohammad Ali Mostafavi, Ayyoub Akbari Moghanjoughi, and Hamid Mousavi. A review and performance analysis of reactive and proactive routing protocols on manet. *Network and Communication Technologies*, 1(2) :48, 2012. (Cf. p. 21.)
- [46] Mandimby Nirina Ranaivo Rakotondravelona. *Utilisation d'une autostructuration pour un routage hiérarchique géographique dans les réseaux sans fil ad hoc*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2017. (Cf. p. 22.)
- [47] Mohammad Mukhtaruzzaman and Mohammed Atiquzzaman. Clustering in vehicular ad hoc network : Algorithms and challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 88:106851, 2020. (Cf. p. 22.)
- [48] Guangyu Pei, Mario Gerla, Xiaoyan Hong, and C-C Chiang. A wireless hierarchical routing protocol with group mobility. In *WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat. No. 99TH8466)*, volume 3, pages 1538–1542. IEEE, 1999. (Cf. p. 22.)
- [49] Inès Doghri. *Stratégies de routage multi-chemin dans les réseaux sans fil multi-sauts*. PhD thesis, Ecole normale supérieure de lyon-ENS LYON, 2012. (Cf. pp. 23, 25.)
- [50] Suresh Singh, Mike Woo, and Cauligi S Raghavendra. Power-aware routing in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 181–190, 1998. (Cf. p. 23.)
- [51] Sencun Zhu, Shouhuai Xu, Sanjeev Setia, and Sushil Jajodia. Establishing pairwise keys for secure communication in ad hoc networks : A probabilistic approach. In *11th IEEE International Conference on Network Protocols, 2003. Proceedings.*, pages 326–335. IEEE, 2003. (Cf. p. 23.)
- [52] Per Johansson, Tony Larsson, Nicklas Hedman, Bartosz Mielczarek, and Mikael Degermark. Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 195–206, 1999. (Cf. p. 23.)
- [53] Srinivas Jhade, V Senthil Kumar, T Kuntavai, Purnendu Shekhar Pandey, Ajith Sundaram, and Gayatri Parasa. An energy efficient and cost reduction based hybridization scheme for mobile ad-hoc networks (manet) over the internet of things (lot). *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11:157–166, 2023. (Cf. p. 23.)
- [54] Mahesh K Marina and Samir R Das. Ad hoc on-demand multipath distance vector routing. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(3) :92–93, 2002. (Cf. pp. 25, 99, 104, 107, 117, 130, 142.)
- [55] Ahmad Al Hanbali, Eitan Altman, and Philippe Nain. A survey of tcp over ad hoc networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 7(3) :22–36, 2005. (Cf. p. 30.)

- [56] Evangelia Tsiontsiou. *Multi-constrained QoS Routing and Energy Optimization for Wireless Sensor Networks*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2017. (*Cf. p. 31.*)
- [57] Farkhana Muchtar, Abdul Hanan Abdullah, Suhaidi Hassan, and Farhan Masud. Energy conservation strategies in host centric networking based manet : A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 111:77–98, 2018. (*Cf. p. 31.*)
- [58] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*, pages 10–pp. IEEE, 2000. (*Cf. p. 32.*)
- [59] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings. Twenty-first annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002. (*Cf. p. 32.*)
- [60] Jae-Hwan Chang and Leandros Tassiulas. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064)*, volume 1, pages 22–31. IEEE, 2000. (*Cf. p. 32.*)
- [61] Vivek P Mhatre, Catherine Rosenberg, Daniel Kofman, Ravi Mazumdar, and Ness Shroff. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Transactions on mobile computing*, 4(1) :4–15, 2005. (*Cf. p. 32.*)
- [62] Alberto Cerpa and Deborah Estrin. Ascent : Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE transactions on mobile computing*, 3(3) :272–285, 2004. (*Cf. p. 32.*)
- [63] Jing Deng, Yunghsiung S Han, Wendi B Heinzelman, and Pramod K Varshney. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10:825–835, 2005. (*Cf. p. 32.*)
- [64] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007. (*Cf. p. 32.*)
- [65] Di Tian and Nicolas D Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 32–41, 2002. (*Cf. p. 32.*)
- [66] Douglas M Blough and Paolo Santi. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 183–192, 2002. (*Cf. p. 32.*)
- [67] Lijuan Cao, Teresa Dahlberg, and Yu Wang. Performance evaluation of energy efficient ad hoc routing protocols. In *2007 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, pages 306–313. IEEE, 2007. (*Cf. p. 33.*)
- [68] Geetha Jayakumar and Gopinath Ganapathy. Performance comparison of mobile ad-hoc network routing protocol. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 7(11) :77–84, 2007. (*Cf. p. 33.*)

-
- [69] S Atri and S Tyagi. Energy based route prioritization for optimum multi-path selection. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 6:89–102, 2023. (Cf. pp. 33, 99, 107, 117.)
- [70] Sameer Alani, Zahriladha Zakaria, and Herwansyah Lago. A new energy consumption technique for mobile ad hoc networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(5) :4147, 2019. (Cf. p. 34.)
- [71] Pinki Nayak, Rekha Agarwal, and Seema Verma. Energy aware routing scheme for mobile ad hoc network using variable range transmission. *arXiv preprint arXiv :1209.2550*, 2012. (Cf. p. 34.)
- [72] Niklas Carlsson and Derek L Eager. Non-euclidian geographic routing in wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 5(7) :1173–1193, 2007. (Cf. p. 34.)
- [73] Saleh A Alghamdi. Load balancing ad hoc on-demand multipath distance vector (lbaomdv) routing protocol. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015:1–11, 2015. (Cf. pp. 34, 99, 107.)
- [74] Mohd Naseem, Gulfam Ahamad, Sparsh Sharma, and Ehtesham Abbasi. Ee-lb-aomdv : An efficient energy constraints-based load-balanced multipath routing protocol for manets. *International Journal of Communication Systems*, 34(16) :e4946, 2021. (Cf. p. 34.)
- [75] Arindrajit Pal, Paramartha Dutta, Amlan Chakrabarti, Jyoti Prakash Singh, and Shayak Sadhu. Biogeographic-based temporal prediction of link stability in mobile ad hoc networks. *Wireless personal communications*, 104:217–233, 2019. (Cf. p. 35.)
- [76] Hongtao Zhang and Lingcheng Dai. Mobility prediction : A survey on state-of-the-art schemes and future applications. *IEEE access*, 7:802–822, 2018. (Cf. p. 35.)
- [77] Rajendran Suraj, Shashikala Tapaswi, Sufian Yousef, Kiran K Pattanaik, and Michael Cole. Mobility prediction in mobile ad hoc networks using a lightweight genetic algorithm. *Wireless Networks*, 22:1797–1806, 2016. (Cf. p. 35.)
- [78] Ahmed Bisengar, Ouadoudi Zytoune, Mohamed Rziza, Mohamed Ouadou, and Driss Abou-tajdine. A routing protocol based on mobility prediction for mobile ad hoc networks. *Journal of Communications Software and Systems*, 10(1) :24–29, 2014. (Cf. p. 35.)
- [79] Ali Moussaoui and Abdallah Boukeream. A survey of routing protocols based on link-stability in mobile ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 47:1–10, 2015. (Cf. p. 35.)
- [80] Nityananda Sarma and Sukumar Nandi. Route stability based qos routing in mobile ad hoc networks. *Wireless Personal Communications*, 54:203–224, 2010. (Cf. p. 35.)
- [81] Ali Moussaoui, Fouzi Semchedine, and Abdallah Boukerram. A link-state qos routing protocol based on link stability for mobile ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 39:117–125, 2014. (Cf. p. 36.)
- [82] Fan Bai and Ahmed Helmy. A survey of mobility models in wireless adhoc networks. *Wireless ad hoc and sensor networks*, pages 1–30, 2004. (Cf. pp. 36, 38.)

- [83] Satveer Kour and Jagpal Singh Ubhi. A study of manet mobility models. *Int J Engg Tech Res*, 3:29–33, 2015. (Cf. pp. 36, 38.)
- [84] Fan Bai, Narayanan Sadagopan, and Ahmed Helmy. Important : A framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks. In *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428)*, volume 2, pages 825–835. IEEE, 2003. (Cf. p. 38.)
- [85] Nouha Baccour, Anis Koubâa, Habib Youssef, and Mário Alves. Reliable link quality estimation in low-power wireless networks and its impact on tree-routing. *Ad Hoc Networks*, 27:1–25, 2015. (Cf. p. 39.)
- [86] Jack Bryan Hughes. *Real-time Link Quality Estimation and Holistic Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks*. PhD thesis, University of Huddersfield, 2018. (Cf. p. 40.)
- [87] Christopher J Lowrance and Adrian P Lauf. Link quality estimation in ad hoc and mesh networks : A survey and future directions. *Wireless Personal Communications*, 96:475–508, 2017. (Cf. p. 40.)
- [88] Liang Hong, Xiang Liu, Lu Zhang, and Wu Chen. Towards sensitive link quality prediction in ad hoc routing protocol based on grey theory. *Wireless Networks*, 21:2315–2325, 2015. (Cf. p. 41.)
- [89] Sabrine Naimi, Anthony Busson, Véronique Vèque, and Ridha Bouallegue. Metric anticipation to manage mobility in mobile mesh and ad hoc wireless networks. *Annals of Telecommunications*, 73:787–802, 2018. (Cf. p. 41.)
- [90] Duc NM Hoang, Jong Myung Rhee, and Sang Yoon Park. Fault-tolerant ad hoc on-demand routing protocol for mobile ad hoc networks. *IEEE Access*, 10:111337–111350, 2022. (Cf. pp. 41, 99, 107.)
- [91] Salah Eddine Benatia. *Routage stable pour les réseaux sans fil mobiles dans les milieux urbains*. PhD thesis, University Mustapha Stambouli of Mascara, 2022. (Cf. p. 41.)
- [92] Labed Saïd. *Méthodes bio-inspirées hybrides pour la résolution de problèmes complexes*. PhD thesis, University Abdelhamid Mehri Constantine 2, 2013. (Cf. p. 44.)
- [93] Kout Akram. *Contributionsa la Résolution du Probleme de Routage dans les Réseaux Mobiles Ad-hoc par les Méthodes Bio-inspirées*. PhD thesis, University Abdelhamid Mehri Constantine 2, 2017. (Cf. pp. 45, 86.)
- [94] Amira Gherboudj. *Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques*. PhD thesis, University Abdelhamid Mehri Constantine 2, 2013. (Cf. pp. 45, 61.)
- [95] Mohamed Sandeli. *Traitement d’images par des approches bio-inspirées*. *Mémoire de Magister, Université Abdelhamid Mehri Constantine 2*, 2014. (Cf. p. 45.)
- [96] S Binitha, S Siva Sathya, et al. A survey of bio inspired optimization algorithms. *International journal of soft computing and engineering*, 2(2) :137–151, 2012. (Cf. pp. 46, 52, 65.)

-
- [97] Thomas Back. *Evolutionary algorithms in theory and practice : evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms*. Oxford university press, 1996. (Cf. pp. 46, 47.)
- [98] David B Fogel. Foundations of evolutionary computation. In *Modeling and Simulation for Military Applications*, volume 6228, page 622801. SPIE, 2006. (Cf. p. 47.)
- [99] John H Holland. *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992. (Cf. p. 48.)
- [100] David E Goldberg. Optimization, and machine learning. *Genetic algorithms in Search*, 1989. (Cf. p. 48.)
- [101] Rainer Storn and Kenneth Price. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11:341–359, 1997. (Cf. p. 49.)
- [102] Hanaa Hachimi. *Hybridations d’algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications*. PhD thesis, INSA de Rouen ; École Mohammadia d’ingénieurs (Rabat, Maroc), 2013. (Cf. p. 49.)
- [103] Eric Bonabeau. Swarm intelligence : From natural to artificial systems. *Oxford University Press google schola*, 2:25–34, 1999. (Cf. pp. 51, 52.)
- [104] Ameer Douib. *Algorithmes bio-inspirés pour la traduction automatique statistique*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2019. (Cf. p. 52.)
- [105] Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo, and Alberto Coloni. Ant system : optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, 26(1) :29–41, 1996. (Cf. pp. 52, 53.)
- [106] R Eberhart and J Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory, micro machine and human science. *Proceedings of the MHS*, 95, 1995. (Cf. p. 52.)
- [107] Xin-She Yang and Suash Deb. Engineering optimisation by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 1(4) :330–343, 2010. (Cf. p. 52.)
- [108] Gai-Ge Wang, Suash Deb, Xiao-Zhi Gao, and Leandro Dos Santos Coelho. A new metaheuristic optimisation algorithm motivated by elephant herding behaviour. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 8(6) :394–409, 2016. (Cf. p. 52.)
- [109] Simon Goss, Serge Aron, Jean-Louis Deneubourg, and Jacques Marie Pasteels. Self-organized shortcuts in the argentine ant. *Naturwissenschaften*, 76(12) :579–581, 1989. (Cf. p. 52.)
- [110] Marco Dorigo. Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano*, 1992. (Cf. p. 53.)
- [111] James Kennedy and Russell Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN’95-international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. iee, 1995. (Cf. p. 54.)
- [112] Craig W Reynolds. Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. In *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 25–34, 1987. (Cf. p. 54.)

-
- [113] Frank Heppner. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. *The ubiquity of chaos*, 1990. (Cf. p. 54.)
- [114] Yuhui Shi and Russell C Eberhart. Parameter selection in particle swarm optimization. In *Evolutionary Programming VII : 7th International Conference, EP98 San Diego, California, USA, March 25–27, 1998 Proceedings 7*, pages 591–600. Springer, 1998. (Cf. p. 56.)
- [115] James Kennedy and Russell C Eberhart. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In *1997 IEEE International conference on systems, man, and cybernetics. Computational cybernetics and simulation*, volume 5, pages 4104–4108. iee, 1997. (Cf. p. 57.)
- [116] Mojtaba Ahmadih Khanesar, Mohammad Teshnehlab, and Mahdi Aliyari Shoorehdeli. A novel binary particle swarm optimization. In *2007 Mediterranean conference on control & automation*, pages 1–6. IEEE, 2007. (Cf. p. 57.)
- [117] Juan Li, Hong Lei, Amir H Alavi, and Gai-Ge Wang. Elephant herding optimization : variants, hybrids, and applications. *Mathematics*, 8(9) :1415, 2020. (Cf. p. 58.)
- [118] Xin-She Yang and Suash Deb. Cuckoo search via lévy flights. In *2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)*, pages 210–214. Ieee, 2009. (Cf. p. 60.)
- [119] Efrén Mezura-Montes, Mauricio Damián-Araoz, and Omar Cetina-Domínguez. Smart flight and dynamic tolerances in the artificial bee colony for constrained optimization. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 1–8. IEEE, 2010. (Cf. p. 62.)
- [120] Bahriye Akay and Dervis Karaboga. A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization. *Information sciences*, 192:120–142, 2012. (Cf. p. 63.)
- [121] Iztok Fister Jr, Xin-She Yang, Iztok Fister, Janez Brest, and Dušan Fister. A brief review of nature-inspired algorithms for optimization. *arXiv preprint arXiv :1307.4186*, 2013. (Cf. p. 65.)
- [122] Ali Reza Mehrabian and Caro Lucas. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecological informatics*, 1(4) :355–366, 2006. (Cf. pp. 65, 67.)
- [123] Adam Slowik. Comparative study on bio-inspired global optimization algorithms in minimal phase digital filters design. In *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*, pages 217–226. Springer, 2014. (Cf. p. 69.)
- [124] Deepak Rai and Kirti Tyagi. Bio-inspired optimization techniques : a critical comparative study. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 38(4) :1–7, 2013. (Cf. p. 69.)
- [125] Salim Bitam and Abdelhamid Mellouk. *Bio-inspired routing protocols for vehicular ad-hoc networks*. John Wiley & Sons, 2014. (Cf. p. 74.)
- [126] Horst F Wedde, Muddassar Farooq, Thorsten Pannenbaecker, Bjoern Vogel, Christian Mueller, Johannes Meth, and Rene Jeruschkat. Beeadhoc : an energy efficient routing algorithm for mobile ad hoc networks inspired by bee behavior. In *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 153–160, 2005. (Cf. p. 75.)
- [127] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics : from design to implementation*. John Wiley & Sons, 2009. (Cf. pp. 76, 77.)

- [128] Mahmoud Hashem Eiza, Thomas Owens, Qiang Ni, and Qi Shi. Situation-aware qos routing algorithm for vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 64(12) :5520–5535, 2015. (*Cf. p. 78.*)
- [129] Anju Sharma and Madhavi Sinha. A differential evolution-based routing algorithm for multi-path environment in mobile ad hoc network. *International Journal of Hybrid Intelligence*, 1(1) :23–40, 2019. (*Cf. p. 78.*)
- [130] Shashi Prabha and Raghav Yadav. Optimal path in mobile ad-hoc networks with differential evolution. *2018 Recent Advances on Engineering, Technology and Computational Sciences (RAETCS)*, pages 1–5, 2018. (*Cf. p. 79.*)
- [131] Pratyay Kuila and Prasanta K Jana. A novel differential evolution based clustering algorithm for wireless sensor networks. *Applied soft computing*, 25:414–425, 2014. (*Cf. p. 79.*)
- [132] Antra Bhardwaj and Hosam El-Ocla. Multipath routing protocol using genetic algorithm in mobile ad hoc networks. *IEEE Access*, 8:177534–177548, 2020. (*Cf. p. 80.*)
- [133] Jatinkumar Patel and Hosam El-Ocla. Energy efficient routing protocol in sensor networks using genetic algorithm. *Sensors*, 21(21) :7060, 2021. (*Cf. p. 80.*)
- [134] Xing Wei, Hua Yang, and Wentao Huang. A genetic-algorithm-based optimization routing for fanets. *Frontiers in Neurorobotics*, 15:697624, 2021. (*Cf. p. 81.*)
- [135] Aishwarya S Hampiholi and BP Vijaya Kumar. Efficient routing protocol in iot using modified genetic algorithm and its comparison with existing protocols. In *2018 3rd international conference on circuits, control, communication and computing (I4C)*, pages 1–5. IEEE, 2018. (*Cf. p. 81.*)
- [136] Shaik Shafi and D Venkata Ratnam. Ant-colony optimization based energy aware cross layer routing protocol to improve route reliability in manets. *Wireless Personal Communications*, 129(3) :1865–1879, 2023. (*Cf. p. 82.*)
- [137] Tarunpreet Kaur and Dilip Kumar. Maco-qcr : Multi-objective aco-based qos-aware cross-layer routing protocols in wsn. *IEEE Sensors Journal*, 21(5) :6775–6783, 2020. (*Cf. p. 83.*)
- [138] Veepin Kumar and Sanjay Singla. Hybrid meta-heuristic aomdv-acopso optimization routing protocol in manet. *Indian J. Comput. Sci. Eng*, 13(4) :1017–1029, 2022. (*Cf. p. 83.*)
- [139] S Rajalakshmi, S Sendhilkathan, and S Sujatha. A meta-heuristic particle swarm optimization-based energy efficient routing protocol for manet. *Appl. Math*, 13(S1) :359–370, 2019. (*Cf. p. 83.*)
- [140] Afsah Sharmin, F Anwar, and SMA Motakabber. A novel bio-inspired routing algorithm based on aco for wsns. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 8(2) :718–726, 2019. (*Cf. p. 85.*)
- [141] Hayder A Nahi, F Al-dolaimy, Fatima Hashim Abbas, Mohammed Almohamadi, Mustafa Asaad Hasan, Mohammed Ayad Alkhafaji, and Muhammet Tahir Güneşer. A multi-objective optimization for enhancing the efficiency of service in flying ad-hoc network environment. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 10(5), 2023. (*Cf. p. 85.*)

- [142] Shahenda Sarhan and Shadia Sarhan. Elephant herding optimization ad hoc on-demand multipath distance vector routing protocol for manet. *IEEE Access*, 9:39489–39499, 2021. (Cf. p. 85.)
- [143] K Sivakami and P Vijayalakshmi. Energy efficient routing using adaptive elephant herding optimization for iot-wsn. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45(4) :5467–5479, 2023. (Cf. p. 86.)
- [144] S Harihara Gopalan. Zhrp-dcsei, a novel hybrid routing protocol for mobile ad-hoc networks to optimize energy using dynamic cuckoo search algorithm. *Wireless Personal Communications*, 118(4) :3289–3301, 2021. (Cf. p. 87.)
- [145] Shayesteh Tabatabaei. A new routing protocol for energy optimization in mobile ad hoc networks using the cuckoo optimization and the topsis multi-criteria algorithm. *Cybernetics and Systems*, 52(6) :477–497, 2021. (Cf. p. 87.)
- [146] A Dinesh and J Rangaraj. An energy-efficient routing protocol for wireless body area networks using hybrid artificial bee colony optimization and chicken swarm optimization algorithm. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(1) :1–37, 2025. (Cf. p. 88.)
- [147] S Nandhini and KS Jeen Marseline. Resilient artificial bee colony optimized aodv routing protocol (rabco-aodv-rp) for minimizing the energy consumption in flying ad-hoc network. (Cf. p. 88.)
- [148] Halil Yetgin, Kent Tsz Kan Cheung, and Lajos Hanzo. Multi-objective routing optimization using evolutionary algorithms. In *2012 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, pages 3030–3034. IEEE, 2012. (Cf. p. 98.)
- [149] T Rehannara Beegum, Mohd Yamani Idna Idris, Mohamad Nizam Bin Ayub, and Hisham A Shehadeh. Optimized routing of uavs using bio-inspired algorithm in fanet : A systematic review. *IEEE access*, 11:15588–15622, 2023. (Cf. p. 98.)
- [150] Abdullah Alabdulatif and Navod Neranjan Thilakarathne. Bio-inspired internet of things : current status, benefits, challenges, and future directions. *Biomimetics*, 8(4) :373, 2023. (Cf. p. 98.)
- [151] Zhengyan Lin, Zhidong Bai, Zhengyan Lin, and Zhidong Bai. Probability inequalities of random variables. *Probability Inequalities*, pages 37–50, 2011. (Cf. p. 103.)
- [152] Yongs Zeng, Qingqing Wu, and Rui Zhang. Accessing from the sky : A tutorial on uav communications for 5g and beyond. *Proceedings of the IEEE*, 107(12) :2327–2375, 2019. (Cf. p. 124.)
- [153] Hazim Shakhatreh, Ahmad H Sawalmeh, Ala Al-Fuqaha, Zuochao Dou, Eyad Almaita, Issa Khalil, Noor Shamsiah Othman, Abdallah Khreishah, and Mohsen Guizani. Unmanned aerial vehicles (uavs) : A survey on civil applications and key research challenges. *Ieee Access*, 7:48572–48634, 2019. (Cf. p. 124.)
- [154] Kamesh Namuduri, Serge Chaumette, Jae H Kim, and James PG Sterbenz. *UAV networks and communications*. Cambridge University Press, 2017. (Cf. p. 124.)

- [155] Debashisha Mishra and Enrico Natalizio. A survey on cellular-connected uavs : Design challenges, enabling 5g/b5g innovations, and experimental advancements. *Computer Networks*, 182:107451, 2020. (Cf. p. 125.)
- [156] Mousaab Bada. *Rèvocation des noeuds et données hostiles dans les réseaux FANETs*. PhD thesis, Université de Laghouat, 2024. (Cf. p. 125.)
- [157] Eric W Frew and Timothy X Brown. Networking issues for small unmanned aircraft systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 54:21–37, 2009. (Cf. pp. 127, 128.)
- [158] Jun Li, Yifeng Zhou, and Louise Lamont. Communication architectures and protocols for networking unmanned aerial vehicles. in 2013 iee globecom workshops (gc wkshps), 2013. (Cf. p. 127.)
- [159] Chen-Mou Cheng, Pai-Hsiang Hsiao, HT Kung, and Dario Vlah. Performance measurement of 802.11 a wireless links from uav to ground nodes with various antenna orientations. In *Proceedings of 15th International Conference on Computer Communications and Networks*, pages 303–308. IEEE, 2006. (Cf. p. 127.)
- [160] Rachel L Finn and David Wright. Unmanned aircraft systems : Surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review*, 28(2) :184–194, 2012. (Cf. p. 127.)
- [161] Xiuzhen Cheng, Xiao Huang, and Ding-Zhu Du. *Ad hoc wireless networking*, volume 14. Springer Science & Business Media, 2013. (Cf. p. 129.)
- [162] Mahmud Iwan Solihin and Mohd Fauzi Zani. Performance comparison of cuckoo search and differential evolution algorithm for constrained optimization. In *IOP conference series : materials science and engineering*, volume 160, page 012108. IOP publishing, 2016. (Cf. p. 130.)
- [163] Md Akhtaruzzaman Adnan and Mohammad Abdur Razzaque. A comparative study of particle swarm optimization and cuckoo search techniques through problem-specific distance function. In *2013 international conference of information and communication technology (ICoICT)*, pages 88–92. IEEE, 2013. (Cf. p. 130.)
- [164] M Mareli and B Twala. An adaptive cuckoo search algorithm for optimisation. *Applied computing and informatics*, 14(2) :107–115, 2018. (Cf. p. 132.)
- [165] Ali Makke. *Détection d’attaques dans un système WBAN de surveillance médicale à distance*. PhD thesis, Université René Descartes-Paris V, 2014. (Cf. p. 140.)
- [166] Tariq Benmansour. *Contrôle et surveillance par les Réseaux de Capteurs Corporels sans Fil (WBAN)*. PhD thesis, Université de Bordeaux ; Université des Sciences et de la Technologie Houari ..., 2020. (Cf. pp. 140, 142.)
- [167] Nourchene Bradai, Lamia Chaari Fourati, and Lotfi Kamoun. Investigation and performance analysis of mac protocols for wban networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 46:362–373, 2014. (Cf. p. 142.)
- [168] Azdad Nabila et al. A qos based comparative analysis of the iee standards 802.15. 4 & 802.15. 6 in wban-based healthcare monitoring systems. In *2019 International conference on wireless technologies, embedded and intelligent systems (WITS)*, pages 1–5. IEEE, 2019. (Cf. p. 142.)

- [169] Zahoor A Khan, Shyamala Sivakumar, William Phillips, and Nauman Aslam. A new patient monitoring framework and energy-aware peering routing protocol (epr) for body area network communication. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 5:409–423, 2014. (Cf. p. 149.)