

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



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

Thème

*Contribution et étude d'un scénario réel de la télésurveillance
en utilisant les drones et en appliquant l'intelligence*

Présenté Par :

DIAWARA Mahamadou

Devant les jurys composés de :

Mr. DEBBAL Mohamed	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr. BEMMOUSSAT Chems Eddine	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mme. SOUIKI Sihem	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur

Année universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce travail tout d'abord à mon très cher père DIAWARA Moussa et à ma très chère maman SANOGO Rokia qui ont su prendre soin de moi en me motivant, en m'encourageant, en me formant et en m'assistant depuis mon enfance jusqu'à nos jours, je les proclame toute ma gratitude.

Suivie de mon très cher frère SISSOKO Abdrahamane qui m'a enseigné toutes les notions de moralités ainsi que de la patience, mes reconnaissances à son égard ne finiront jamais.

A mes très chers oncles DIAWARA Loukmane et DIAWARA Nouhoum qui m'ont dirigé et guidé tout le long de mon enfance et qui me poussent toujours à dépasser mes limites. Là où je suis aujourd'hui en ce qui concerne mes études une partie est grâce à eux. Grâce à ces deux derniers la quête du savoir m'est devenue une passion.

Je ne s'aurais terminé sans rendre hommage à mon frère et ami BELOUM Dramane pour son soutien et son aide.

A tous mes amis en particulier ceux qui se reconnaîtront pour m'avoir aidés et encouragés tout au long de mes études

Remerciements

Je remercie tout d'abord le tout puissant, le tout miséricordieux, le sage par excellence de m'avoir accordé cette vie, de me faire connaître ce pays ci (Algérie) et m'avoir fait connaître les gens que j'ai connu ici et dans le monde entier.

Je remercie énormément mon mentor et encadrant Dr. BEMMOUSSAT Chems Eddine pour sa franchise, son courage, ses motivations, sa disponibilité ainsi que son esprit critique à chercher toujours le fond des choses.

Tous mes remerciements au président du jury Dr. DEBBAL Mohamed d'avoir accepté de présider ce jury ainsi que pour son enseignement en Réseaux mobiles et sans fil.

Tous mes remerciements à Dr. SOUIKI Sihem d'avoir acceptée d'être l'examinatrice de ce travail ainsi que pour son enseignement en Réseau haut débit et en Télévision numérique.

Tous mes remerciements à DEMBELE Issa et Abdel Razak HAMADOU ADAMOU pour leurs soutiens et leurs aides.

Enfin, tous mes remerciements à l'ensemble de mes enseignants, camarades, et à toute la communauté étrangère.

Résumé

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons présenté un état de l'art sur les protocoles de routages existants dans les FANETs afin d'enrichir nos connaissances sur les problématiques des FANETs. Nous avons ensuite amélioré le protocole de routage hiérarchique en utilisant une nouvelle technique basé sur l'intelligence artificielle pour la sélection du cluster head afin d'avoir un choix optimal. Cette technique consiste à fournir trois paramètres d'entrée à notre système flou intégré, qui après l'application des règles floues et en conjonction avec le moteur d'inférence indiquera la décision la plus appropriée pour choisir le cluster head. Cette technique a permis d'avoir des résultats satisfaisants par rapport aux travaux réalisés à partir d'un ou deux paramètres pour le choix du cluster head.

Pour ce projet, nous avons utilisé MATLAB pour réaliser nos simulations.

Mots-clés : FANET, cluster head, intelligence artificielle.

Abstract

In this end-of-study project, we presented a state of the art on existing routing protocols in FANETs in order to enrich our knowledge on FANETs issues. We then improved the hierarchical routing protocol using a new technique based on artificial intelligence for the selection of the cluster head in order to have an optimal choice. This technique consists in providing three input parameters to our integrated fuzzy system, which after applying the fuzzy rules and in conjunction with the inference engine will indicate the most appropriate decision to choose the cluster head. This technique has given satisfactory results compared to the work done using one or two parameters for the choice of the cluster head.

For this project, we used MATLAB to perform our simulations.

Keywords: FANET, cluster head, artificial intelligence.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Acronymes et abréviations	xi
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralités sur les FANETs

I.1	Introduction	3
I.2	MANET (Mobile ad hoc network).....	3
I.3	VANET (vehicular ad hoc network)	5
I.4	FANETs (flying ad hoc network).....	6
I.4.1	Applications des FANETs	7
I.4.2	Modes de communication.....	8
I.4.2.1	Communication sans fils air-air	9
I.4.2.2	Communication sans fil air-sol	9
I.4.3	Modèles de mobilité	9
I.4.3.1	Random way point mobility model	10
I.4.3.2	Modèle de mobilité de Gauss Markov	10
I.4.3.3	Reference point group mobility (RPGM).....	11
I.4.3.4	Manhattan Grid	12
I.4.4	Protocoles de communication.....	12
I.4.4.1	Au niveau de la couche physique.....	12

I.4.4.2	Au niveau de la couche MAC	13
I.4.4.3	Au niveau de la couche réseau	14
I.5	Conclusion.....	14

Chapitre II: Les protocoles de routage: l'etat de l'art

II.1	Introduction	15
II.2	Les protocoles de routage.....	15
II.2.1	Les protocoles de routage statique.....	15
II.2.1.1	Load carry deliver routing (LCAD)	16
II.2.1.2	Multilevel Hierarchical Routing (MLH)	16
II.2.2	Protocole de routage proactif (PRP)	17
II.2.2.1	OLSR.....	18
II.2.2.2	DOLSR.....	18
II.2.3	Protocole de routage réactif (RRP) :.....	19
II.2.3.1	AODV	20
II.2.3.2	Dynamic source routing (DSR).....	20
II.2.4	Protocole de routage géographique.....	20
II.2.4.1	GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing).....	21
II.2.4.2	Geographic Position Mobility Oriented Routing (GPMOR)	22
II.2.5	Protocole de routage hybride	22
II.2.5.1	Temporary Ordered Routing Algorithm (TORA)	22
II.2.5.2	Reactive greedy reactive routing protocol (RGR):.....	23
II.2.6	Protocole de routage hiérarchique.....	24
II.2.6.1	Cluster-Based Routing Protocol (CBRP).....	24
II.3	Conclusion.....	25

Chapitre III: L'intelligence artificielle

III.1	Introduction	26
-------	--------------------	----

III.2	La logique floue	26
III.2.1	Définition	26
III.2.2	Historique.....	26
III.2.3	Principe de base de la logique floue	27
III.2.3.1	Notion d'appartenance partielle.....	27
III.2.3.2	Univers de discours	30
III.2.3.3	Fonctions d'appartenance	30
III.2.3.4	Variable linguistique.....	31
III.2.3.5	Propriétés des ensembles flous	32
III.2.3.5.1	Égalité	32
III.2.3.5.2	Inclusion.....	32
III.2.3.5.3	Support.....	32
III.2.3.5.4	Hauteur.....	32
III.2.3.5.5	Noyau	33
III.2.3.5.6	Cardinal.....	33
III.2.3.5.7	Partition floue.....	33
III.2.3.6	Operateurs de la logique floue.....	33
III.2.3.7	Règles d'inférence floue	36
III.2.4	Structure d'un système de commande floue	37
III.2.4.1	Interface de fuzzification	38
III.2.4.2	Base de connaissance.....	38
III.2.4.3	Inférence floue	39
III.2.4.4	Interface de défuzzification	39
III.3	Conclusion.....	40

Chapitre IV: Simulations et interprétations

IV.1	Introduction	41
IV.2	Le choix du logiciel.....	41

Table des matières

IV.3	Notion de base sur MATLAB	41
IV.4	Notre scénario	43
IV.5	Intégration de la logique floue dans la simulation pour le choix du CH:.....	45
IV.5.1	Notre système d'inférence floue	45
IV.5.2	Ensemble des règles floues et le moteur d'inférence.....	46
IV.6	Résultats et discussions	50
IV.7	Conclusion.....	52
	Conclusion générale	54
	Perspectives	54
	Bibliographie	56

Liste des figures

Figure I-1: Topologie d'un réseau MANET	4
Figure I-2: Modèle en couches des MANETs	4
Figure I-3: Modes de communication dans un STI	5
Figure I-4: Modes de communication dans les systèmes multi-UAVs.....	6
Figure I-5: Exemple de la surveillance avec des drones collaboratifs.....	8
Figure I-6 : communication sans fils entre les nœuds FANETs	9
Figure I-7: Random way point mobility model	10
Figure I-8: Modelé de mobilité de Gauss Markov	11
Figure I-9 : RPGM.....	11
Figure I-10: Manhattan Grid.....	12
Figure I-11 : architecture multicouche proposée	14
Figure II-1: Load Carry and Deliver Routing.....	16
Figure II-2: Multilevel Hierarchical Routing.....	17
Figure II-3: Les MPRs	18
Figure II-4 : le schéma fonctionnel du DOLSR.....	19
Figure II-5 : La transmission géographique gloutonne.....	21
Figure II-6: mécanisme du Protocol RGR	23
Figure II-7: CBRP.....	25
Figure III-1: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	27
Figure III-2 : Représentation des variables booléenne classique.	28
Figure III-3: Représentation des variables floues.....	28
Figure III-4: Différentes formes des fonctions d'appartenance.....	31
Figure III-5 : Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique.	32
Figure III-6 : Exemple d'une partition floue formée de trois ensembles flous.....	33
Figure III-7: Opérateur ET	34
Figure III-8: Opérateur OU.....	35
Figure III-9: Opérateur NON.....	35
Figure III-10: Structure de base du régulateur flou RLF.....	38
Figure IV-1 : surveillance d'une forêt par une flotte de drone	43
Figure IV-2 : processus d'inférence floue.	45
Figure IV-3 : fonction d'appartenance de la stabilité	48

Figure IV-4 : fonction d'appartenance de l'énergie.....	48
Figure IV-5 : fonction d'appartenance de la connectivité.....	49
Figure IV-6 : fonction d'appartenance de la sortie CH.....	49
Figure IV-7 : La représentation 3D du choix de CH pour une faible connectivité.....	50
Figure IV-8 : La représentation 3D du choix de CH pour une connectivité moyenne	50
Figure IV-9 : La représentation 3D du choix de CH pour une forte connectivité	51
Figure IV-10 : Comparaison des différents modèles	52
Figure IV-11 : Le logigramme de notre algorithme proposé	55

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparaison des MANETs, VANETs et FANETs.....	7
Tableau IV-1 : les règles floues	47

Acronymes et abréviations

AODV: Ad hoc On Demand Distance

CBRP: Cluster-Based Routing Protocol

CH: Cluster Head

DAG: directed acyclic graph

DCF: Distributed Coordination Function

DOLSR: Directional Optimized Link State Routing

DSDV: Destination Sequenced Distance Vector

DSR: Dynamic source routing

FANET: fly ad hoc network

GPMOR: Geographic Position Mobility Oriented Routing

GPS: Global Positioning System

GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing

HRP: hybrid routing protocol

IA: Intelligence Artificielle

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IETF: Internet Engineering Task Force

LCAD: Load carry deliver routing

LEACH: low energy Adaptive Clustering Hierarchy

LET: Link Expiration Time

LLC: Logical Link Layer

MAC: medium access control

MANET: mobile ad hoc network

MG: Manhattan Grid

MLH: Multilevel Hierarchical Routing

MPCA: Mobility Prediction Clustering Algorithm

MPR: Multi-Point Relays

OLSR: Optimized Link State Routing Protocol

OSI: Open System Interconnection

PCF: Point Coordination Function

Acronymes et abréviations

PDA: Personal Digital Assistant

PFE : projet de fin d'étude

PHY: physique

PRP: Proactive Routing Protocol

PSO: particle swarm optimization

R ERR: Route error

R REP: Route reply

R REQ: Route request

RGR: Reactive greedy reactive routing protocol

RLF: Régulateur a logique floue

RPGM: Reference point group mobility

RPR: Reactive Routing Protocol

STI: Intelligent Transportation System

TCP/IP: Transport Control Protocol/ Internet Protocol

TORA: Temporary Ordered Routing Algorithm

UAV: Unmanned Aerial Vehicles

UD : Univers de discours

USMP: UAV Search Mission Protocol

VANET: vehicular ad hoc network

Introduction générale

Ces dernières années, la recherche de nouveaux mécanismes de communication sans fil a été très motivée, avec une forte croissance due aux nouvelles technologies ou configurations dans les technologies aériennes, à la surveillance des zones difficiles d'accès ou en cas de catastrophe. C'est dans ce contexte qu'en 2013, Ilker Bekmezci a introduit le concept de FANET, un réseau ad hoc de nœuds volants et a fourni une étude détaillée sur FANET dans [1]. Les drones sont chargés de surveiller une zone en capturant des images et en les envoyant à une station de base au sol dans un processus connu sous le nom de communication UAV-sol. Bien qu'il existe de nombreuses applications de drones, l'utilisation de plusieurs systèmes de drones coopérant entre eux peut être utile à bien des égards. Mais il faut aborder des questions et des défis différents dans le cas du système multi-UAV. La coopération entre les drones est essentielle dans un système multi-drones qui nécessite une meilleure communication et c'est l'un des problèmes majeurs des FANETs [1]. Les exigences diffèrent de celles des réseaux traditionnels, tels que le réseau mobile ad hoc (MANET) ou le réseau ad hoc pour véhicules (VANET) :

- (a) positionner les UAV de la manière la plus appropriée pour surveiller les régions, en minimisant les coûts et en maximisant la performance du réseau ;
- (b) réduire les effets négatifs de la haute mobilité des drones ;
- (c) les protocoles de routage traditionnels ne sont pas capables de gérer, de manière classique, les réseaux concurrents, en particulier les réseaux ad hoc, en raison des caractéristiques telles qu'une grande mobilité des nœuds et des changements de topologie.

Cela peut compromettre la communication entre les drones et les performances du réseau. C'est pourquoi il est important d'élaborer une stratégie pour assurer une communication adéquate dans ces conditions, en fournissant des ressources qui garantissent des performances satisfaisantes et intelligentes afin de réduire les problèmes sélectionnés. Un autre point important à considérer dans les scénarios FANET/UAV est que la plupart des appareils mobiles ont un vol moyen d'environ 30 minutes en raison de la capacité limitée de la batterie. Ce fait permet de tirer la conclusion suivante : un drone avec une faible charge de batterie, cessera de faire partie du réseau aérien en raison de sa "mort", ce qui obligera le réseau à s'auto configurer et à restructurer et réorganiser sa topologie, évitant ainsi les dommages qui pourraient affecter la communication aérienne sans fil. Pour cette raison, il est nécessaire de déterminer et/ou de prévoir quels appareils ont une faible autonomie de vol ou sont proches de l'incapacité, afin de minimiser les impacts sur la qualité de la communication.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités sur les réseaux ad hoc des drones (FANETs) pour illustrer leurs caractéristiques et leurs spécificités.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les différents protocoles de routages présents dans les FANETs.

Le troisième chapitre contient une présentation des concepts de base de la logique floue entre autre : la définition, l'historique, la structure, le fonctionnement, la classification, caractéristiques, et les avantages de la logique

Le quatrième chapitre est une solution de notre recherche qui décrit les interprétations et l'analyse des résultats approuvés.

Enfin une conclusion générale regroupe les différentes conclusions, nous rappelons les principales contributions, le résultat de notre travail et nous citons les principales perspectives

Chapitre I : Généralités sur les FANETs

I.1 Introduction

Dans la télésurveillance, les FANETs (Flying ad hoc network) constituent l'une des parties la plus importante. Les réseaux ad hoc de drones définissent une nouvelle forme de MANET (mobile Ad hoc network) où les nœuds sont des drones qui permettent de retransmettre les messages vers leurs destinations. En effet, récemment des recherches ont été menées permettant de créer des systèmes multi-drones collaboratifs comme dans [2] ou dans [3] où plusieurs drones coopèrent entre eux afin d'accomplir une mission avec des meilleures performances. Ces systèmes collaboratifs nécessitent l'établissement de communications inter-drones pour assurer la coordination entre les différents agents du système comme l'échange de positions géographiques pour l'évitement de collisions ou pour la ré-planification autonome de tâches entre les agents d'une mission. Les réseaux ad hoc de drones peuvent être appliqués aux systèmes où plusieurs drones sont utilisés, un seul drone ne peut pas créer un réseau ad hoc.

Pour mieux développer ce présent PFE, il est nécessaire d'étudier l'ensemble des notions nécessaires à la compréhension des FANETs. Pour cela nous présentons ces différentes notions dans ce chapitre.

I.2 MANET (Mobile ad hoc network)

Un réseau mobile ad hoc (MANET) est un réseau ad hoc multi-saut qui se distingue essentiellement par la mobilité des terminaux qui le composent [4]. Les recherches concernant les MANETs sont concentrées sur ce qu'on appelle «MANET pur à usage-général» (en anglais : Pure General-Purpose MANET). «Pur» indique qu'aucune infrastructure n'est supposée assurer les fonctionnalités du réseau et qu'aucune autorité n'est en charge de la gestion et de contrôle du réseau. «Usage générale» signifie que ces réseaux ne sont pas conçus pour une application spécifique, mais qu'ils peuvent supporter n'importe quelle application TCP/IP conventionnelle. Les algorithmes et les protocoles proposés pour les MANETs sont conçus pour un scénario comme celui de la **Figure I-1**. Les terminaux composant un MANET sont typiquement des ordinateurs portables, des PDA et des téléphones mobiles.

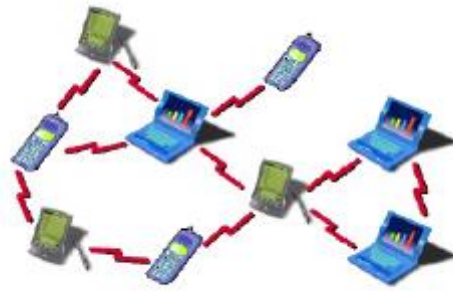


Figure I-1:Topologie d'un réseau MANET

Le groupe de travail MANET créé au sein de l'IETF constitue le point de référence pour les activités de recherche en matière des MANETs. L'objectif de ce groupe de travail MANET est la spécification et la standardisation des protocoles de routage pour les réseaux ad hoc au niveau IP. Ces protocoles doivent pouvoir supporter des couches physiques et MAC hétérogènes et offrir aux couches supérieures la possibilité de fonctionner uniquement sur IP. Comme le montre la **Figure I-2** [4], le modèle en couche adopté pour les MANETs est directement calqué de l'architecture TCP/IP.

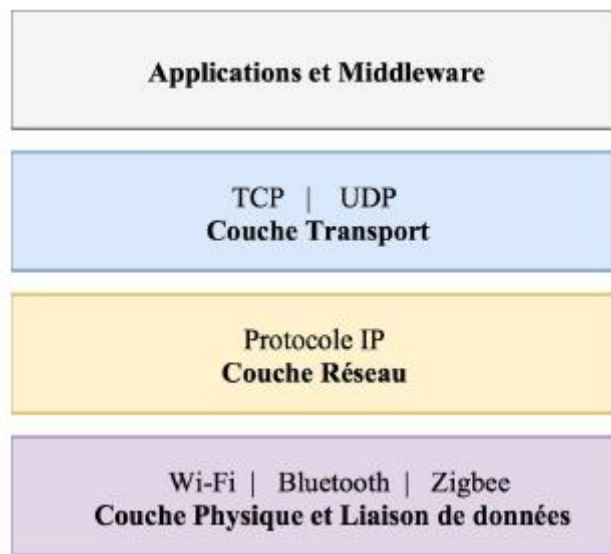


Figure I-2: Modèle en couches des MANETs

Lorsque les équipements de communication dans un MANET sont embarqués à bord de véhicules on parle plutôt d'un réseau véhiculaire ad hoc (VANET). Les réseaux ad hoc de drones se présentent comme une classe spécifique des VANETs. Ces deux familles de réseaux sont présentées dans les sections suivantes et, respectivement.

I.3 VANET (vehicular ad hoc network)

Les avancements technologiques, notamment, dans les domaines de la télécommunication et de l'informatique ubiquitaire ont permis l'émergence du concept des systèmes de transport intelligents (STIs). En Europe, les STIs se définissent comme les nouvelles applications des technologies de l'information et de la communication dans le domaine du transport urbain [5]. Cette évolution vise à rendre les systèmes de transports plus sûrs, plus efficaces, plus fiables et plus écologiques. Pour ce faire, les STIs sont sensés offrir deux types d'applications [6]:

- Applications de sécurité dont l'objectif est d'améliorer la sécurité des passagers et de réduire les accidents mortels. Ces applications doivent détecter les obstacles, prévenir les collisions et les travaux sur les routes et distribuer les informations météorologiques.
- Applications de confort qui peuvent être liées au contexte véhiculaire et fournissent donc aux conducteurs des informations routières concernant par exemple les embouteillages ou les places de parking. Les applications de confort concernent aussi l'accès mobile à Internet par les passagers leur permettant de consulter des emails, de télécharger des fichiers ou de mettre à jour les applications embarquées dans les véhicules.

Comme le montre la **Figure I-3** [5], les communications dans un STI peuvent s'adosser à une infrastructure de télécommunication existante (V2R) ou bien se dérouler directement entre les véhicules (V2V). Les réseaux ad hoc véhiculaires prennent en charge la partie de ces communications sans infrastructure. La mobilité (vitesse et déplacement) des nœuds dans un VANET est délimitée par l'environnement ainsi que par le trafic routier.

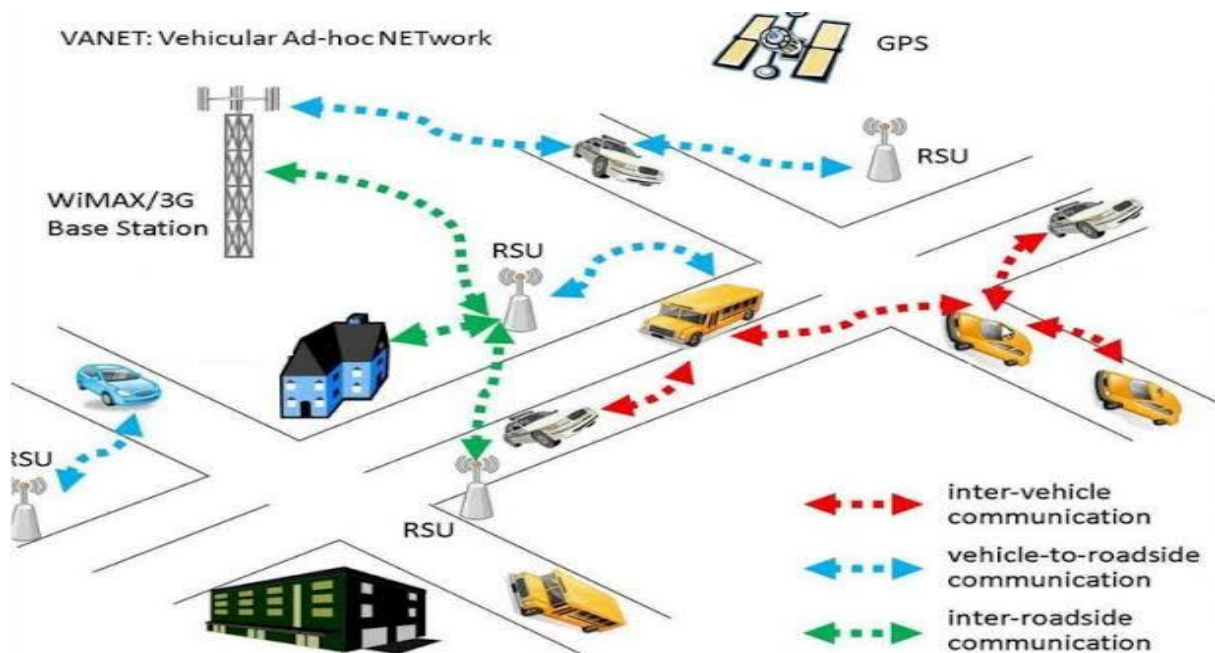


Figure I-3: Modes de communication dans un STI

I.4 FANETs (flying ad hoc network)

Les réseaux ad hoc de drones ou FANETs (Flying ad hoc networks) se présentent comme une sous famille des VANETs [1]. Les FANETs sont apparus en réponse au besoin d'interconnexion de plusieurs drones ou UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) au sein d'un system multi-UAV. Un drone est défini dans [7] comme un avion sans pilote qui peut naviguer de manière autonome en utilisant un système embarqué ou à l'aide d'un système de commande à distance. Un drone est typiquement équipé par des capteurs pour déterminer sa position et collecter des informations sur une zone d'intérêt. Les drones promettent des nouvelles applications aussi bien militaires que civiles telles que : l'interconnexion des réseaux ad hoc terrestres, les opérations de recherche et de secourismes après une catastrophe naturelle, la détection et la poursuite de cibles militaires, la surveillance de feux de forêts, la télédétection agricole, etc.

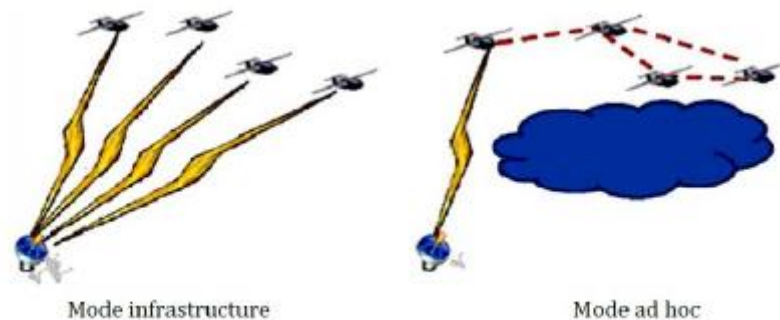


Figure I-4: Modes de communication dans les systèmes multi-UAVs.

Dans un système multi-UAV (**Figure 1.4**, [1]), les stations de base terrestres ou satellitaires assurent les communications de type UAV à infrastructure. Cependant, avec l'augmentation du nombre des UAVs au sein du système, la communication directe entre les UAVs se révèle une alternative intéressante à la communication centralisée passant via les stations de base. Cela peut être réalisé par l'établissement d'un réseau ad hoc entre les UAVs. En effet, l'utilisation de plusieurs drones en mode ad hoc présente les avantages suivants[7]:

- Réduction du temps d'accomplissement des missions : des missions de reconnaissance, de surveillance et de secours peuvent être accomplies plus rapidement selon le nombre des drones utilisés.
- Réduction du coût de maintenance total : au lieu d'utiliser un seul grand UAV onéreux, il vaut mieux utiliser plusieurs mini-drones dont le coût de maintenance de chacun est minimal.

- Scalabilité (Passage à l'échelle) : le théâtre des opérations peut être facilement élargi en incorporant tant de drones que nécessaire.
- Réduction de la détectabilité par les radars : c'est une propriété importante pour les applications militaires. Vu leur petite taille, les mini-UAVs possèdent des faibles signatures.

Critère de comparaison	MANET	VANET	FANET
Mobilité des nœuds	Faible	Haute	Très haute
Modèle de mobilité	Aléatoire	Régulier	Aléatoire/régulier
Changement de topologie	Lent	Rapide	Très rapide
Densité	Faible	Haute	Très faible
Problème d'énergie	Posé	N'est pas posé	Posé pour les mini-UAVs
Puissance de calcul	Limité	Elevée	Elevée

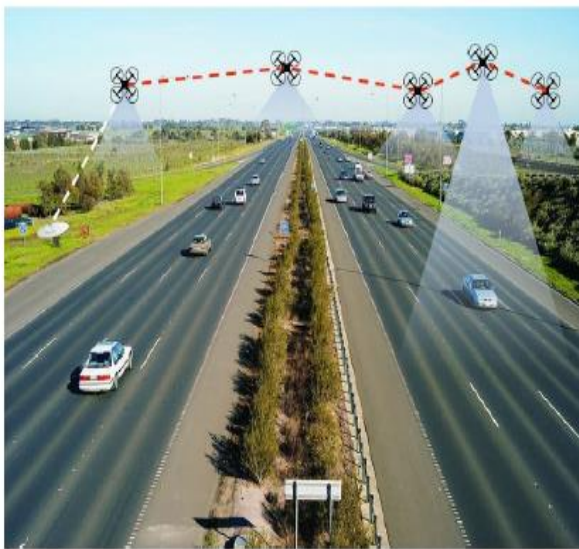
Tableau I-1 : Comparaison des MANETs, VANETs et FANETs

I.4.1 Applications des FANETs

Les drones ont des centaines d'applications, parmi lesquelles on peut citer [8] :

- Services publics et collectivités (Assistance police, Enquête écologique...)
- Agriculture (Surveillance des zones agricoles, Analyse des cultures...)
- Cartographie (géomètre expert, Analyse numérique des terrains, reconstitution 3D...)
- Architectures et urbanisme (Etude de chantier ou de grands ouvrages sur des angles de vue permettant une meilleure implantation).
- Intervention en sécurité civile (Intervention dans des situations d'urgence afin d'apporter un soutien aux autorités locales pour la surveillance de zones sinistrée).
- Tourisme et suivi d'évènements (Films et photos touristiques avec des angles de vue ne peuvent être effectués avec du matériel standard).
- Missions dangereuses (détection de gaz toxiques, radiations).
- Surveillance :
 - Surveillance de territoire réglementée (chasse, pêche...)

- Surveillance de chantiers routiers, ferroviaires, bâtiments et travaux publics...)
- Surveillance des frontières
- Surveillance du trafic routier et du transport de matières dangereuses.
- Industrie :
 - Contrôles de zones à risques
 - Surveillance d'installations (panneaux solaires, éoliennes, antennes, etc.).



(a) La surveillance routière



(b) La surveillance des feux de forêts

Figure I-5: Exemple de la surveillance avec des drones collaboratifs[9]

I.4.2 Modes de communication

Les FANETs ont une norme similaire à celle des MANET dans lesquels les nœuds volent, ce qui crée des caractéristiques différentes. La **figure I-6** montre deux types de communications différents qui peuvent être établis entre les nœuds formant un FANET classique : [10]

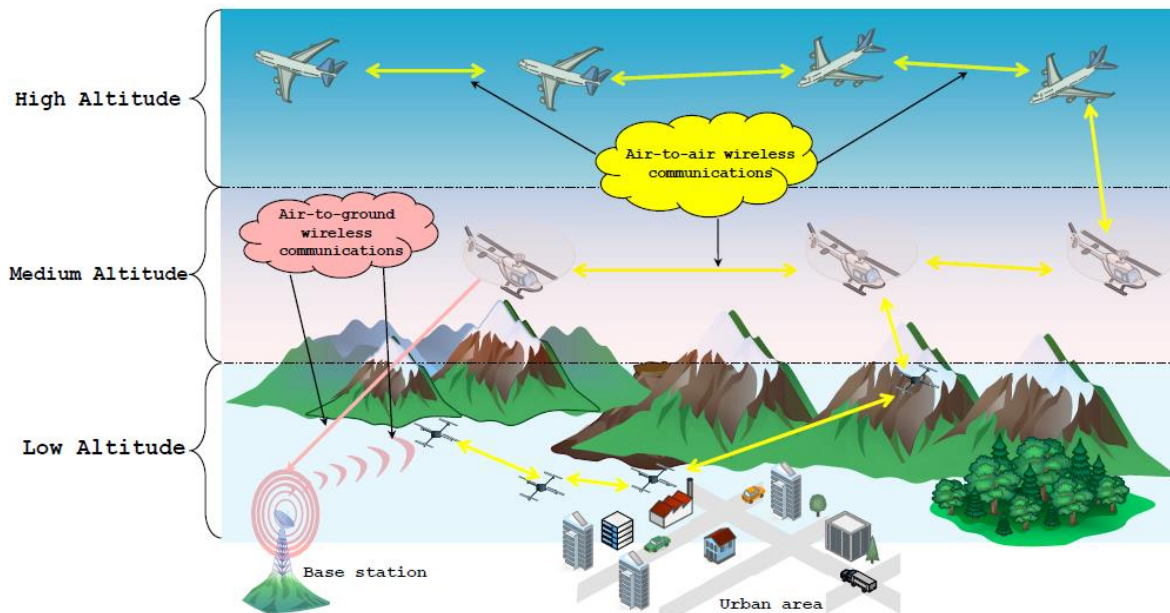


Figure I-6 : communication sans fils entre les nœuds FANETs [10]

I.4.2.1 Communication sans fils air-air

Il s'agit de la communication entre les drones dans un réseau ad hoc afin d'échanger des informations entre eux. En effet les drones peuvent communiquer entre eux en utilisant une architecture purement ad hoc afin d'éviter les restrictions sur les portées de transmission imposées par la communication entre les drones et les stations de base au sol. De plus ce type de communication sans fil peut être utilisé pour prendre en charge différentes applications et communication a sauts multiples lorsque le nœud veut établir une transmission du paquet de données vers un autre nœud en dehors de la portée [10].

I.4.2.2 Communication sans fil air-sol

Ce mode permet la communication entre les drones et les stations de base. Dans FANET, tous les drones ne peuvent pas communiquer avec les infrastructures existantes telles que les stations au sol et les satellites. Toutefois, seuls certains drones peuvent établir une communication avec les infrastructures afin d'améliorer et d'accroître la connectivité et de fournir des services supplémentaires [10].

I.4.3 Modèles de mobilité

Les modèles de mobilité représentent le mouvement des nœuds et la façon dont leurs emplacements, leurs vitesses et leurs accélérations changent au fil du temps [11]. Il existe plusieurs types de modèles de mobilité parmi lesquels on peut citer :

I.4.3.1 Random way point mobility model

Dans tous les modèles de mobilité basés sur l'aléatoire, les nœuds du drone sont libres de se déplacer de manière aléatoire dans n'importe quelle direction dans la zone de simulation. On peut dire qu'un nœud est libre de choisir sa destination, sa vitesse et sa direction. Les drones décident de leurs actions en fonction de probabilités fixes. Jusqu'à présent, le modèle des points de cheminement aléatoires est utilisé comme modèle synthétique pour la mobilité dans la plupart des scénarios de simulation. Cependant, il ne convient pas aux avions car ceux-ci ne changent pas de direction et de vitesse de mobilité rapidement en une fois et ne peuvent pas rester pendant un certain temps au même endroit comme le modèle des points de cheminement aléatoires. Ces modèles de mobilité sont basés sur trois actions : aller "tout droit", "tourner à gauche", "tourner à droite" [11]. La simulation du modèle de mobilité des points de cheminement aléatoires ressemble à la **figure I-7** :

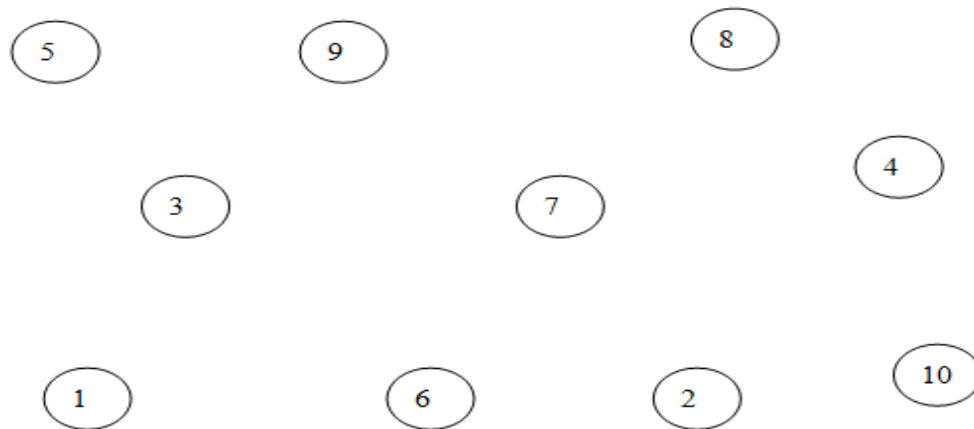


Figure I-7: Random way point mobility model [11]

I.4.3.2 Modelé de mobilité de Gauss Markov

Le modèle de mobilité de Gauss Markov est utilisé pour simuler le comportement d'un drone dans un essaim. La taille de la zone simulée est variable. La position du nœud est toujours dirigée par sa position précédente en raison de la vitesse de déplacement élevée. La trajectoire d'un drone est déterminée par la mémoire du modèle. Dans le modèle de mobilité de Gauss-Markov, chaque nœud est initialisé avec une vitesse et une direction. Par des intervalles de temps fixes, le mouvement se produit pour mettre à jour la vitesse et la direction de chaque nœud. Pour être précis, la valeur de la vitesse et la direction au nième moment sont calculées sur la base de la valeur de la vitesse et de la direction au $n - 1$ premier et une variable aléatoire. Comme le montre la **figure I-8**, le nœud se déplace en fonction de la position du nœud précédent.

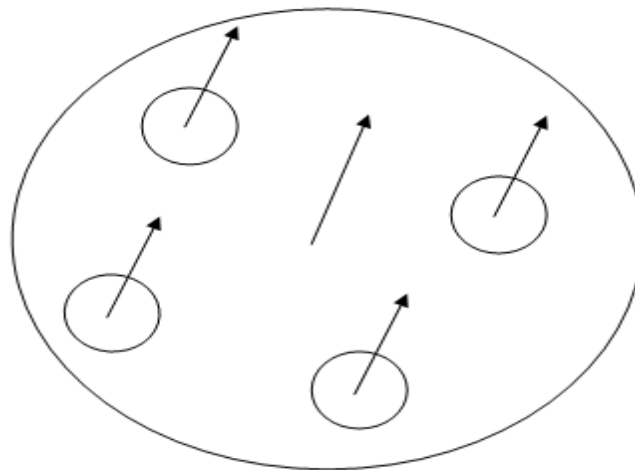


Figure I-8: Modelé de mobilité de Gauss Markov [11]

I.4.3.3 Reference point group mobility (RPGM)

Dans le RPGM chaque groupe ou cluster a un point de référence sur lequel le mouvement, la direction, la vitesse et l'accélération de tous les membres du groupe en dépendent. La tête du groupe est positionnée au point de référence pendant toute la simulation, les nœuds membres le suivent. Ainsi, le réseau de drones au sein du cluster est dans un état de connexion totale la plupart du temps. Les nœuds volent en formation et la grappe reste intacte et aucun nouveau drone n'y entre ou n'en sort [12].

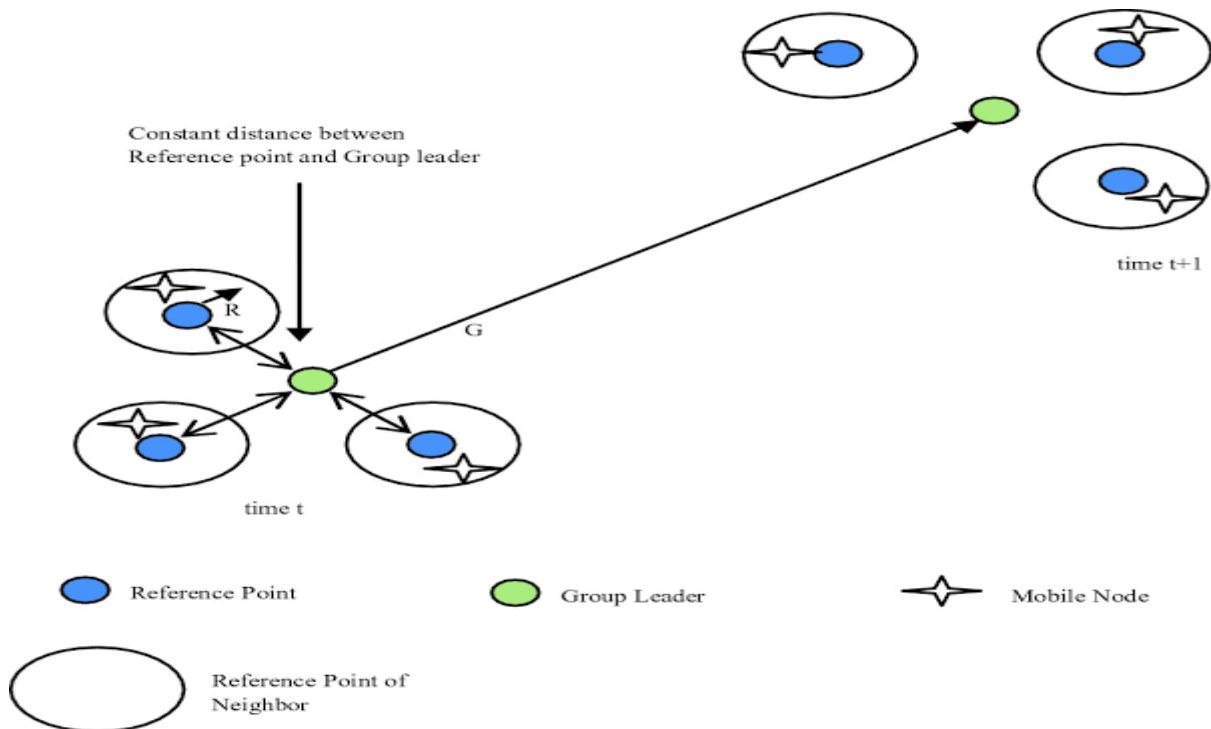


Figure I-9 : RPGM

I.4.3.4 Manhattan Grid

Le modèle de mobilité du réseau de Manhattan (MG), illustré sur la **figure I-10**, utilise une topologie de route quadrillée. Ce modèle fonctionne comme une route droite horizontale et verticale en choisissant une approche probabiliste pour le nœud à chaque intersection, un drone choisit soit d'avancer, soit de devoir tourner. Bien que les directions des nœuds puissent être modifiées, cela impose des restrictions géographiques à la mobilité des nœuds [13].

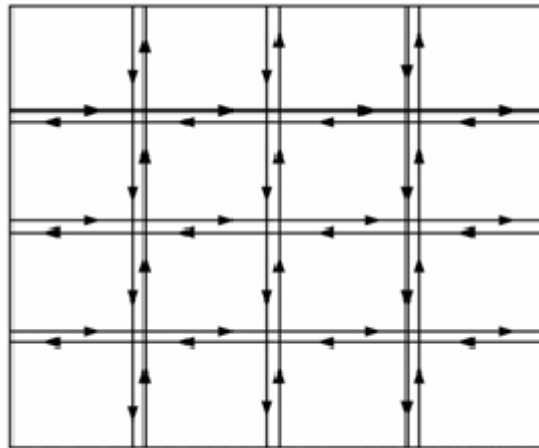


Figure I-10:Manhattan Grid

I.4.4 Protocoles de communication

I.4.4.1 Au niveau de la couche physique

La couche physique concerne les technologies de base de la transmission du signal, comme la modulation ou le codage du signal. Différentes séquences de bits de données peuvent être représentées par différentes formes d'onde en faisant varier la fréquence, l'amplitude et la phase d'un signal. Globalement, dans la couche physique, les bits de données sont modulés en formes d'onde sinusoïdales et transmis dans l'air à l'aide d'une antenne. Le rendement du système MANET dépend fortement de sa couche physique, et la mobilité extrêmement élevée pose des problèmes supplémentaires au FANET. Afin de développer des architectures de communication de données robustes et durables pour FANET, les conditions de la couche physique doivent être bien comprises et bien définies. Récemment, des scénarios de communication entre drones et entre drones et sol ont été largement étudiés dans des environnements de simulation et en temps réel. Les modèles de propagation radio et les structures d'antenne sont étudiés comme les facteurs clés qui influencent la conception de la couche physique de FANET[1].

I.4.4.2 Au niveau de la couche MAC

Les questions importantes que la couche MAC de FANET devrait aborder sont la qualité variable des liens, les retards de paquets et l'utilisation optimale des canaux pendant le fonctionnement du réseau en temps réel. Pour le protocole de la couche MAC, l'IEEE 802.11 a été utilisée en même temps que l'optimisation des composants matériels commerciaux, tels que les antennes directionnelles et omnidirectionnelles[14]. Dans [15] il a été déclaré que la norme IEEE 802.11 régit le fonctionnement de la couche physique (PHY), de la couche MAC et de la couche *Logical Link Layer* (LLC) de la pile protocolaire OSI. Elle dispose de deux méthodes d'accès : la méthode Point Coordination Function (PCF) et la méthode Distributed Coordination Function (DCF). Avec la méthode d'accès PCF, les stations de base ont la charge de l'accès au médium radio de manière centralisée. Avec la méthode DCF, l'accès est totalement distribué et il n'existe aucune distinction entre les stations de base. Ces particularités justifient le fait que le DCF peut être employé en mode ad hoc et en mode infrastructure alors que le PCF ne peut l'être qu'en mode infrastructure. Un autre protocole à faible puissance, moins complexe et à faible débit de données, IEEE 802.15.4 MAC, pour les communications entre drones dans les FANETs a été proposé dans [12]. Ce protocole peut être utilisé pour les applications moins gourmandes en bande passante telles que la surveillance et le contrôle, la gestion des feux de forêt, la télédétection et relayant les réseaux qui nécessitent l'échange d'informations de contrôle au sein du réseau. De telles applications ne nécessitent pas nécessairement un protocole à haut débit de données tel que IEEE 802.11, car la nature du message échangé sur le réseau est principalement constituée de données de contrôle sensibles au temps, informations sur la localisation des drones et mise à jour des assignations de tâches. Ainsi, la communication entre drones peut être réalisée efficacement en déployant un protocole à faible débit de données tel qu'IEEE 802.15.4 [14].

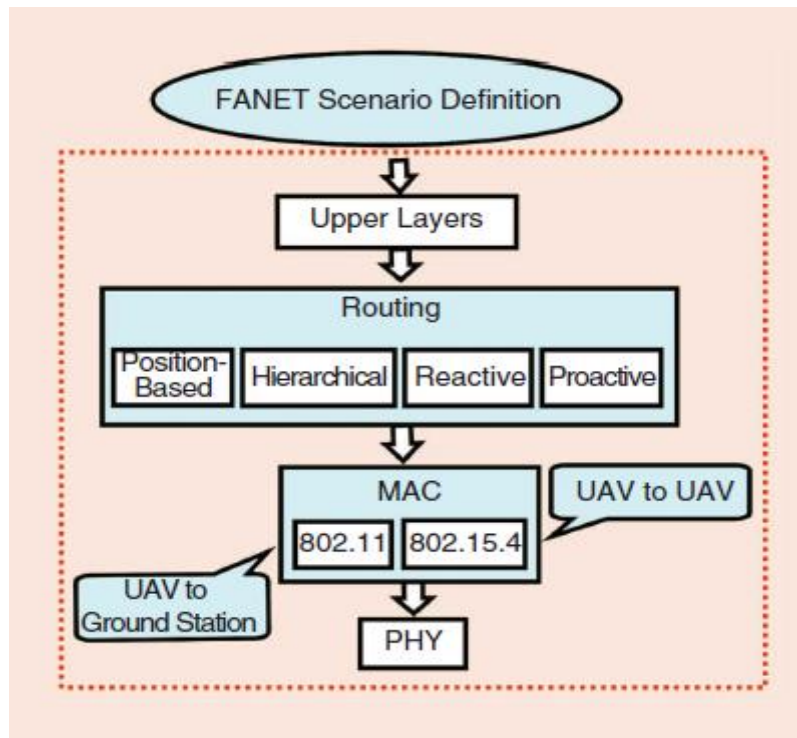


Figure I-11 : architecture multicouche proposée[14]

I.4.4.3 Au niveau de la couche réseau

Afin d'acheminer une information entre deux drones distants, un ou plusieurs nœuds intermédiaires dans le réseau coopèrent entre eux par la retransmission des données jusqu'à leurs destinations. En effet, les protocoles de routage sont responsables de choisir la meilleure route vers la destination qui minimise les collisions, les interférences, ou encore le délai [16].

Il est important de noter qu'un réseau ad hoc de drone a pour particularité la grande mobilité de ses nœuds. Les changements fréquents de topologie impliquent des changements de route et donc une surcharge de gestion (« overhead ») du mécanisme de routage. Et il est nécessaire de restaurer rapidement une route qui aurait été perdue pour éviter une perte de paquets.

Puisque les protocoles de routage est parmi les objectifs principale de notre projet, nous avons réservés un chapitre complet sur les différents protocoles de routage et ainsi un état de l'art de ces derniers dans les réseaux FANET. Le chapitre suivant détaillera cette partie.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu un ensemble de définitions et de concepts qui nous a permis de bien définir les réseaux FANET, nous avons enrichie nos recherches sur les trois couches basses du modèle OSI afin de bien comprendre les fonctionnements de chaque couche. Le prochain chapitre fera l'objet d'une étude détaillée sur la couche réseau, plus précisément les protocoles de routages car c'est le but de notre sujet.

Chapitre II: Les protocoles de routage : l'état de l'art

II.1 Introduction

Afin d'acheminer une information entre deux drones distants, un ou plusieurs nœuds intermédiaires dans le réseau coopèrent entre eux par la retransmission des données jusqu'à leurs destinations. En effet, les protocoles de routage sont responsables de choisir la meilleure route vers la destination qui minimise les collisions, les interférences, ou encore le délai. La nature hautement mobile des drones finit par entraîner des changements fréquents de topologie, ce qui entraîne des problèmes de connectivité pour une communication efficace. Cette mobilité implique donc une instabilité des routes qui doivent être recalculées plus ou moins souvent en fonction de la dynamique du réseau. Au cours des dernières années, plusieurs recherches ont été proposées pour résoudre les problèmes de routage dans les FANETs comme dans [9],[17],[18],[12] et [19]. Nous présentons ici les plus courantes accompagnées de quelques exemples représentatifs.

II.2 Les protocoles de routage

La nature hautement dynamique des drones dans les FANET entraîne des changements brusques dans la topologie du réseau et fait donc du routage entre les drones une tâche cruciale [14]. En ce qui concerne la communication entre les drones, les protocoles de routage jouent un rôle essentiel dans le transport fiable des données de bout en bout et la réduction des frais de routage fait du routage un sujet de recherche intéressant dans le domaine des FANETS. Cependant, le principal défi à relever pour concevoir des protocoles de routage adaptés à tous les scénarios et à toutes les conditions est encore à l'étude. Dans les études et expériences initiales sur les FANET, les protocoles de routage MANET et VANET existants sont préférés et étudiés pour les FANET. Toutefois, en raison des caractéristiques spécifiques des drones, telles que les changements rapides de la qualité des liaisons et les mouvements rapides dans l'espace 3D, le routage du réseau devient une tâche cruciale et la plupart des protocoles de routage des MANET et des VANET ne sont pas directement applicables aux FANET. Ces routages sont classés en six grandes catégories à savoir :

II.2.1 Les protocoles de routage statique

Dans les protocoles de routage statique, chaque drone dispose d'une table de routage qui n'est pas mise à jour pendant la mission. Les protocoles de routage statiques sont applicables dans les cas où la topologie du réseau ne change pas et où les choix de sélection des routes sont limités. Ici, chaque drone communique avec les autres drones ou avec la station au sol et ne stocke que leurs informations. Cela permet de réduire le nombre de liaisons de communication.

Toutefois, en cas d'échec de la mise à jour de la table de routage, il est obligatoire d'attendre que la mission soit terminée. Par conséquent, certains protocoles ne sont pas tolérants aux fautes [20]. Il y a plusieurs protocoles de routage statique parmi lesquels on peut citer :

II.2.1.1 Load carry deliver routing (LCAD)

Dans le modèle LCAD, un UAV stocke les données d'un nœud terrestre source et les transmet en volant vers un nœud terrestre de destination comme illustrée dans la **figure II-1**. Même si, au départ, dans le cadre de la LCAD, un scénario à source unique et à destination unique a été examiné, en pratique, la mise en œuvre de scénarios à sources multiples et à destinations multiples peut également être facilement possible si nécessaire. Les principaux objectifs du routage LCAD sont de maximiser le débit et d'augmenter la sécurité. Cependant, le principal inconvénient de ce protocole est que, lorsque la distance entre les drones en communication augmente, le délai de transmission devient exceptionnellement grand et intolérable. Pour réduire le délai de transmission, plusieurs drones peuvent être utilisés sur le même trajet, où la distance entre les drones doit être minimale et la vitesse des drones peut être augmentée, et le réseau LCAD peut être divisé en sous-réseaux plus petits [20].

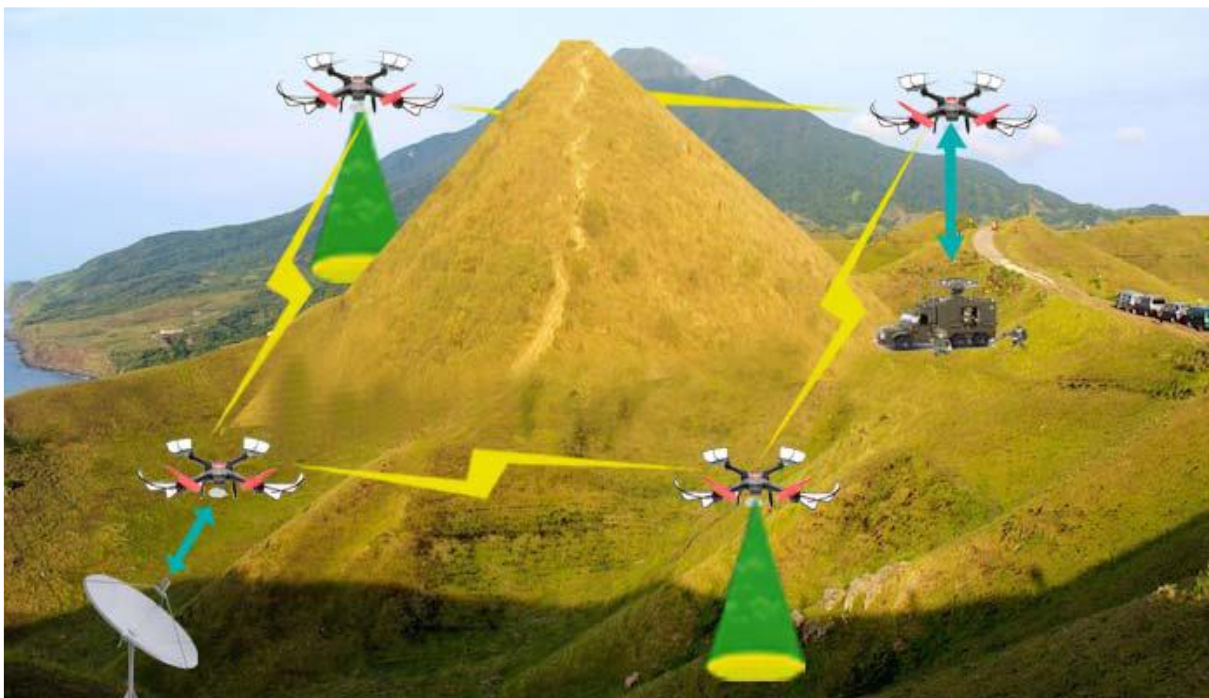


Figure II-1: Load Carry and Deliver Routing[20]

II.2.1.2 Multilevel Hierarchical Routing (MLH)

Un autre ensemble de solutions de routage pour les FANET sous routage statique est le protocole hiérarchique à plusieurs niveaux. Le protocole de routage MLH est conçu pour traiter

le problème de l'extensibilité du réseau. Ici, le réseau peut être regroupé en un certain nombre de grappes désignées dans différentes zones d'opération, comme illustré à la **figure II-2**. Chaque grappe possède une tête de grappe (CH), qui décrit la grappe entière et possède également des connexions en dehors de la grappe. Il est également possible d'assigner différentes tâches à chaque cluster dans le MLH réseau. Tous les drones d'une grappe sont à portée de communication directe de la CH. Le CH est directement ou indirectement connecté aux drones ou satellites de la couche supérieure. Le MLH peut produire de meilleures performances si les drones sont disposés en différents essais avec une large zone d'opération, et de multiples drones sont déployés dans le réseau. Toutefois, le problème de conception le plus crucial pour le routage MLH est celui des informations sur les grappes [20].



Figure II-2: Multilevel Hierarchical Routing[20]

II.2.2 Protocole de routage proactif (PRP)

La PRP utilise une table de routage pour stocker tous les routages dans le réseau de communication. Ces tables de routage sont mises à jour et partagées périodiquement entre les nœuds. Lorsque la topologie change, les tables doivent être mises à jour. Le principal avantage du PRP est qu'il contient toujours les informations les plus récentes. Pour continuer à mettre à jour les tables de routage, des messages de routage doivent être échangés entre tous les nœuds de communication. Toutefois, cela nécessite une bande passante trop importante et rend le réseau inadapté. Lorsque la topologie du réseau change, elle montre la lenteur de la réponse qui entraîne un retard dans le réseau [21]. On peut citer parmi les protocoles de routage proactif :

II.2.2.1 OLSR

OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) est un exemple des protocoles proactif. Il maintient les routes dans une table mise à jour à travers l'émission périodique des paquets Hello. En effet, OLSR utilise deux types de messages :

- le message Hello : utilisé pour détecter les voisins directs, situés à la portée de communication de l'émetteur. Il contient la liste des voisins connus. Ce message est périodiquement retransmis vers les voisins des voisins (voisins à deux-sauts) ;
- le message de contrôle de la topologie est utilisé périodiquement pour la maintenance des informations du système récoltées.

Cet échange permet à chaque nœud de calculer des routes vers chaque destination bien qu'il surcharge le réseau. Afin de réduire l'interférence causée par ce fonctionnement, la méthode MPR (Multi-Point Relays) est utilisée. Les MPRs sont des nœuds sélectionnés pour retransmettre les messages vers leurs voisins afin de réduire le nombre de retransmission dans le réseau. En plus ils ont un rôle principal dans le routage et la sélection des chemins entre chaque source et sa destination. En général, les MPRs sont les voisins a un saut qui couvrent le maximum des voisins à deux sauts **figure II-3 [16]** .

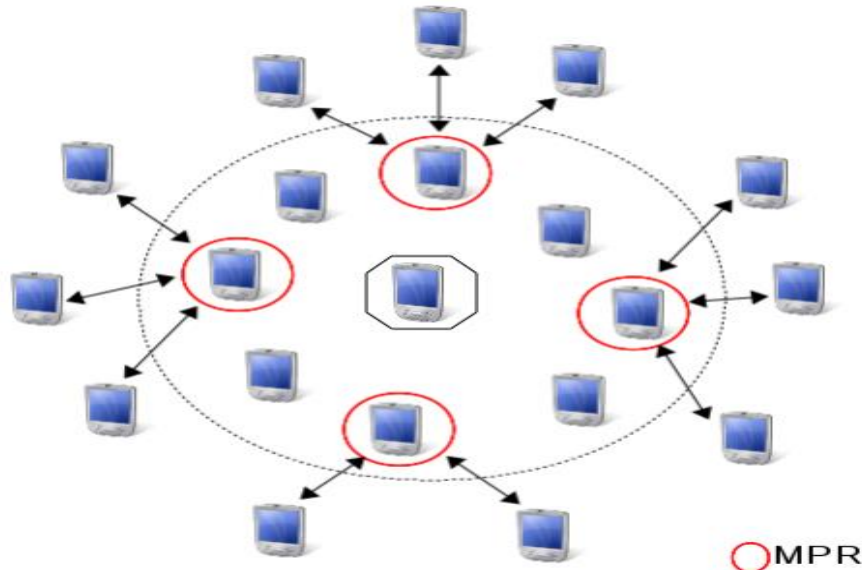


Figure II-3: Les MPRs

II.2.2.2 DOLSR

Comme AODV, OLSR est la base d'autres propositions comme DOLSR (Directional Optimized Link State Routing). Ce protocole est conçu pour être utilisé avec des antennes directionnelles et en inter couches (cross layer). La technique d'inter-couches permet de

communiquer entre deux couches qui ne sont pas voisines ainsi que de lire et de contrôler les paramètres des autres couches. Par conséquent, elle permet de concevoir conjointement plusieurs protocoles de différents niveaux. Cette approche est considérée comme une méthode efficace pour améliorer les performances d'un réseau sans fil.

Le but de DOLSR est de diminuer le nombre des MPRs afin d'améliorer les performances des réseaux ad hoc entre les drones en termes de délais de bout en bout, trafic de contrôle et d'interférence [16].

La figure II-4 montre un diagramme pour le DOLSR suggéré. Pour chaque paquet de données envoyé, le drone émetteur calcule la distance au drone récepteur, puis si la distance est supérieure à la distance maximale qui peut être atteinte en utilisant l'antenne directionnelle ($D_{max}/2$), ou également si l'antenne omnidirectionnelle ne peut pas atteindre la destination, le drone appliquera l'algorithme DOLSR Sinon, l'OLSR sera généralement utilisé. [20]

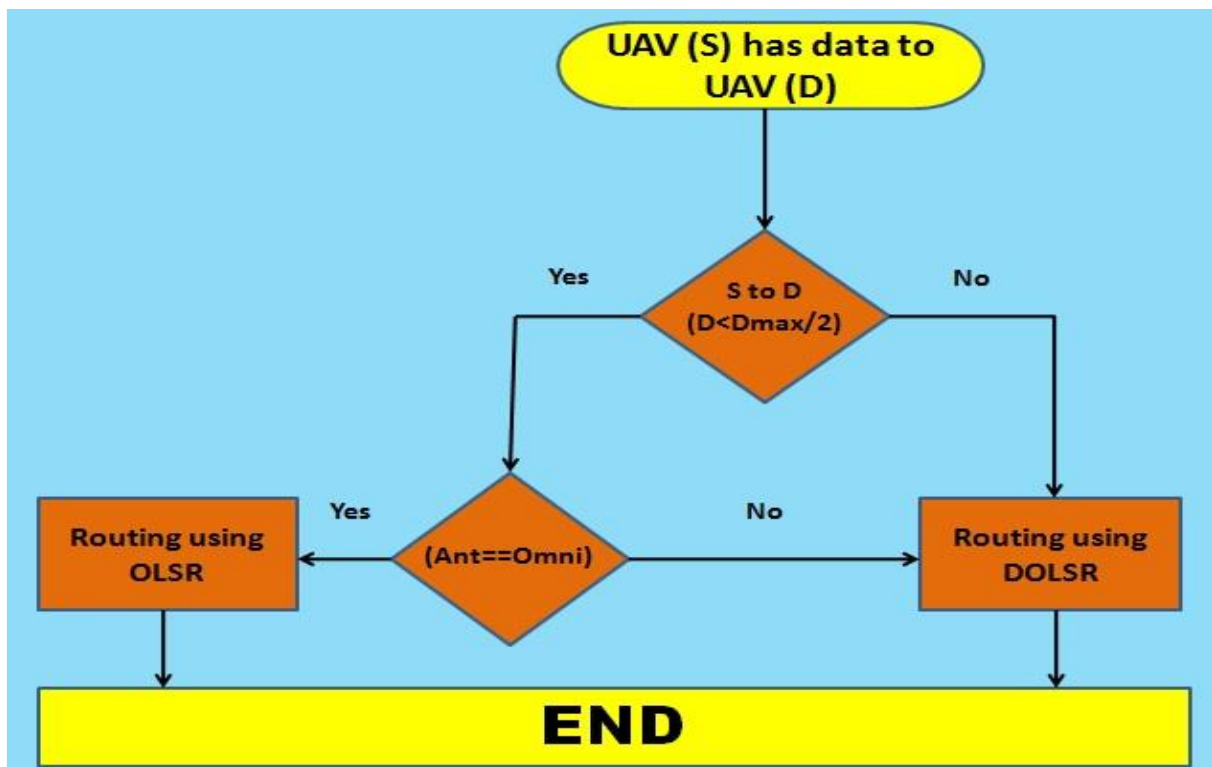


Figure II-4 : le schéma fonctionnel du DOLSR

II.2.3 Protocole de routage réactif (RRP) :

Le RRP est un protocole de routage à la demande. Une route entre une paire de nœuds est stockée lorsqu'ils communiquent entre eux. Le principal objectif de conception du RRP est de surmonter le problème de surcharge des protocoles de routage proactifs. Au cours du processus de routage, une forte latence peut apparaître en raison du temps nécessaire pour trouver

l'itinéraire. Le RRP comporte deux catégories : l'une est le routage à la source, l'autre le routage "hop-by-hop". Dans le cas du routage source, le paquet porte l'adresse complète de la source à la destination, de sorte que les nœuds intermédiaires peuvent facilement faire suivre les paquets en fonction des informations. Un autre protocole de routage manuel, saut par saut, transporte simplement l'adresse de destination et l'adresse du saut suivant dans le paquet. Pour transmettre les données, un nœud intermédiaire est responsable de la maintenance des tables d'acheminement[21] . Parmi les protocoles de routage réactif on peut citer :

II.2.3.1 AODV

L'AODV est un protocole de routage réactif "hop-by-hop". Il détermine l'itinéraire de la source à la destination uniquement lorsque la source prend l'initiative, et le conserve aussi longtemps que la source le souhaite. Pour découvrir la destination, un paquet de demande d'itinéraire (RREQ) est diffusé par le nœud source. La fonction des nœuds intermédiaires n'est pas seulement de transmettre des RREQ mais aussi de se mettre à jour avec les informations de la source. Un paquet de réponse de route (RREP) contient le nombre de sauts nécessaires pour atteindre la destination. Un message de paquet d'erreur d'acheminement (RERR) est généré en cas de route non valide pour informer le nœud source de la défaillance de la liaison afin que cette source puisse relancer la découverte de la route. L'AODV ajuste l'état dynamique du lien, la surcharge de la mémoire et la faible utilisation du réseau. En raison de la recherche de la nouvelle destination, il souffre d'un problème de latence [21].

II.2.3.2 Dynamic source routing (DSR)

Le DSR a été principalement conçu pour les maillages sans fil à bords multiples des réseaux ad hoc de nœuds mobiles. La DSR permet aux réseaux de s'auto-configurer et de s'auto-organiser sans aucune infrastructure de réseau existante. Dans DSR, le nœud source est responsable de la diffusion d'un RREQ à ses nœuds voisins. Il peut y avoir de nombreuses demandes d'itinéraires des messages dans le réseau de communication. C'est pourquoi, le nœud source ajoute un identifiant de demande de destination pour éviter toute confusion. La méthode de réparation des routes est utilisée lorsque le nœud source n'est pas en mesure d'utiliser sa voie actuelle en raison de changements dans la topologie du réseau [21].

II.2.4 Protocole de routage géographique

Des protocoles de routage basés sur la position ont été proposés pour prendre en compte la connaissance des informations de position géographique des drones afin de permettre un

routage efficace. Dans ce type de protocoles, ils supposent que l'UAV source connaît la position physique des drones communicants et envoie le message vers les drones de destination sans découverte de route. En général, chaque drone détermine sa propre position à l'aide d'un système GPS ou de tout autre type de dispositif de positionnement. Cet algorithme de routage est principalement inspiré par deux sujets :

- une fonction de positionnement est normalement utilisée par l'expéditeur d'un paquet pour localiser la position physique du récepteur et
- une approche d'acheminement est utilisée pour transmettre les paquets de données à l'UAV prévu[20].

Il existe plusieurs protocoles de routage géographique parmi lesquels on peut citer:

II.2.4.1 GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [22] est un exemple de ces protocoles. Il permet de marquer les paquets avec la position géographique de leurs destinations et par la suite chaque nœud émetteur peut faire un choix optimal de son prochain saut en se basant sur la méthode gloutonne (greedy) : le voisin ayant la position géographique la plus proche de celle de la destination finale du paquet comme dans la **figure II-5**.

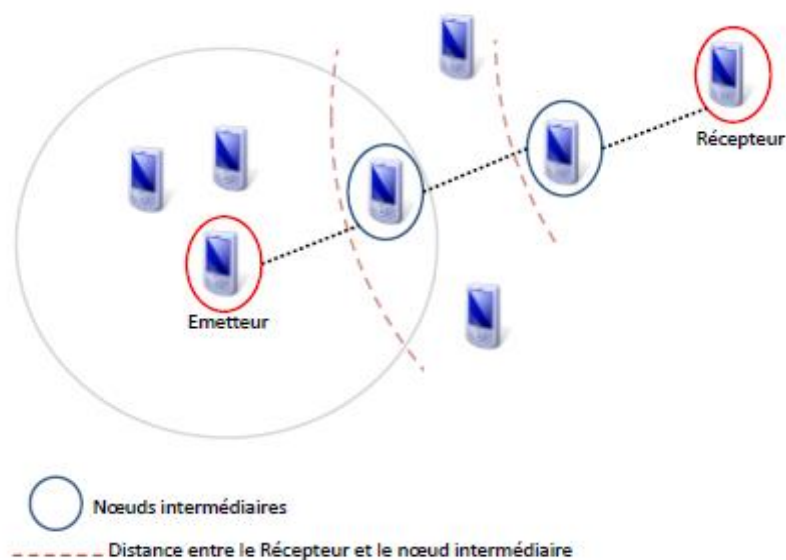


Figure II-5 : La transmission géographique gloutonne[16]

Dans le cas où un nœud échoue à trouver un relais optimal vers la destination, GPSR se rétablit par le routage autour du périmètre de la région. Dans [23], une étude comparative par simulation de trois protocoles de routage : un géographique (GPSR), un réactif (AODV) et un proactif (OLSR), dans le contexte d'un réseau ad hoc de drones, montre que GPSR offre de meilleures

performances que les autres protocoles en termes de taux de livraison et de délai des paquets échangés. En utilisant GPSR, les auteurs de [24] proposent de bénéficier des échanges des positions géographiques réalisés par le protocole de routage pour améliorer les performances de la mission de recherche. Ce protocole, nommé USMP (UAV Search Mission Protocol), se base sur les informations géographiques de routage pour résoudre le conflit entre les trajectoires des aéronefs. USMP permet d'améliorer l'efficacité de la recherche en termes de couverture et de minimiser les changements de direction des drones.

II.2.4.2 Geographic Position Mobility Oriented Routing (GPMOR)

Le routage orienté par la mobilité de la position géographique (GPMOR) a été présenté pour les FANETs. Les solutions classiques basées sur la position ne dépendent que des informations de localisation des drones. Cependant, le GPMOR calcule également le mouvement des drones à l'aide du "modèle de mobilité Gaussien-Markov", et il utilise ces données pour localiser le prochain saut. Il est étudié que ce mécanisme de routage peut fournir une transmission de données efficace en ce qui concerne le ratio de livraison de paquets et la latence.[20]

II.2.5 Protocole de routage hybride

Pour minimiser les problèmes de surcharge des protocoles proactifs et réactifs, des protocoles de routage hybrides sont introduits : Le RRP a besoin de plus de temps pour découvrir les itinéraires, tandis que le PRP a une importante surcharge de messages de contrôle. Le HRP convient aux réseaux à grande échelle qui peuvent comporter plusieurs sous-réseaux, où le routage intra-zone utilise le PRP et le routage inter-zone utilise le RRP [21].

Bahloul et al. ont proposé un mécanisme hybride de communication entre les drones basé sur le protocole Boids Reynolds et AODV dans [9]. La solution qu'ils proposent comporte trois étapes, à savoir AODV pour le calcul de routage réactif, méthode Boids Reynolds pour la connectivité et la découverte de la station de base au sol. La méthode Boid Reynolds est une méthode bio-inspirée du maintien de la formation de volées d'oiseaux ou de bancs de poissons avec trois règles de base : la séparation, l'alignement et la cohésion. Il existe d'autres protocoles hybrides parmi lesquels on peut citer :

II.2.5.1 Temporary Ordered Routing Algorithm (TORA)

Le TORA (Temporarily Ordered Routing Algorithm) est un protocole de routage hybride adapté aux réseaux multi-boucles. Dans cette approche de routage, chaque UAV ne met à jour que les informations de routage concernant les UAV adjacents. Les principales caractéristiques

de l'utilisation de cet algorithme de routage sont de limiter la propagation du message de contrôle dans un environnement très mobile afin de minimiser les réactions rapides aux changements topologiques. TORA utilise en particulier des protocoles de routage réactifs, mais aussi des approches proactives dans certains cas. Elle construit et maintient un graphique acyclique dirigé (DAG) de l'UAV source à l'UAV destination. TORA n'est pas basé sur l'algorithme du chemin le plus court, des routes plus longues sont normalement utilisées pour minimiser la surcharge du réseau. Chaque UAV a une valeur de paramètre appelée "hauteur" dans DAG, et deux UAV n'ont pas la même valeur de hauteur. Les données circulent des drones les plus hauts vers les drones les plus bas, comme dans le cas d'une approche descendante. Il offre un routage sans boucle, car aucun flux de données ne circule vers les drones de plus grande hauteur. Dans le processus de découverte de route, ce paramètre de hauteur est renvoyé au drone demandeur, et dans cette approche, tous les drones intermédiaires conservent leurs tables de routage en fonction des informations de routes et de hauteurs entrantes..[21]

II.2.5.2 Reactive greedy reactive routing protocol (RGR):

Chaque drone émetteur établit une route vers la destination en se basant sur la méthode réactive d'AODV. En cas où un nœud de cette route ne parvient pas à trouver un chemin à cause de la mobilité, il passe à la méthode géographique **figure II-6** [16]. Le paquet est acheminé ainsi vers le voisin le plus proche géographiquement de la destination finale. Le passage de l'adressage IP à l'adressage géographique semble compliqué puisque chaque catégorie nécessite un échange spécifique de données et de différents mécanismes de traitement et de calcul.

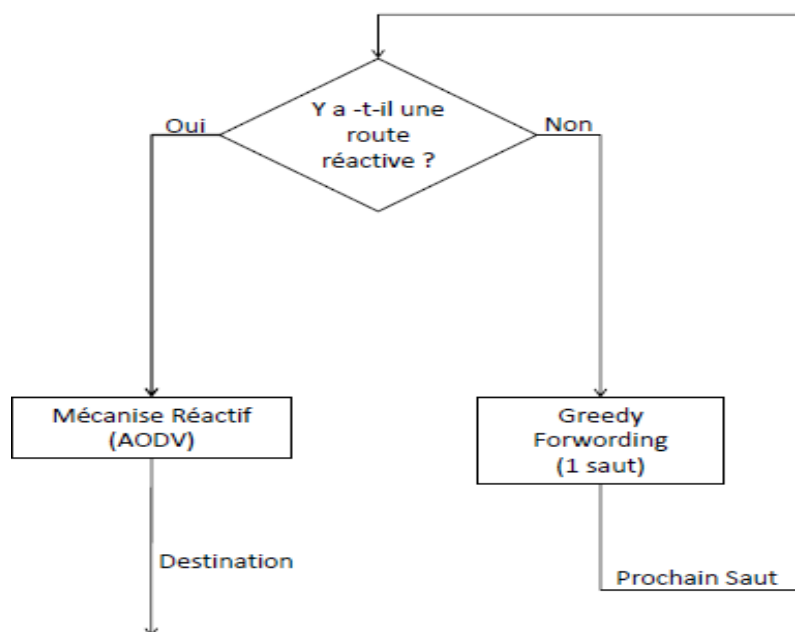


Figure II-6: mécanisme du Protocol RGR

II.2.6 Protocole de routage hiérarchique

La nature hautement mobile des drones finit par entraîner des changements fréquents de topologie, ce qui entraîne des problèmes de connectivité pour une communication efficace. La réponse à ces problèmes est le routage hiérarchique connu sous le nom de clustering. La mise en grappe décompose le réseau en sous-groupes. Un cluster est généralement constitué d'une tête de cluster (CH) et de ses membres correspondants (m). La sélection de la tête de grappe, qui est une phase importante des algorithmes de mise en grappe [18], s'effectue parmi tous les membres et elle a la responsabilité de gérer l'ensemble de la grappe pour la communication inter et intra grappe.

Au cours des dernières années, plusieurs recherches ont été proposées pour résoudre les problèmes de routage en utilisant la mise en grappe dans FANET. Dans [17], les auteurs ont proposé un schéma de mise en grappe pour un essaim de drones nommé MPCA qui utilise la combinaison de la prédiction de la structure du dictionnaire et du temps d'expiration du lien (LET). Le LET, entre deux drones, est calculé sur la base de la localisation des drones et de leurs informations de mobilité. Le CH est élu sur la base du plus grand poids des drones voisins et le CH diffuse ensuite l'annonce du CH aux drones voisins. Le drone qui reçoit plusieurs messages, considère le CH avec un LET plus long. Son principal avantage est de réduire l'instabilité de la mise en grappe et améliorer ainsi les performances du réseau.

Dans [14], les auteurs ont présenté un projet de FANETs à plusieurs groupes pour une régulation efficace des réseaux, dans lequel le projet soumis réduit notamment la valeur des communications, améliore les performances du réseau et exploite un protocole IEEE 802.15.4 (MAC) moins complexes et à faible débit pour les communications inter et intra-clusters. Ils ont examiné un prototype de mobilité, appelé Reference Point Group Mobility (RPGM). Ils ont analysé les performances du réseau pour deux prototypes proactifs de (DSDV, OLSR) et un protocole réactif (AODV). Il existe d'autres protocoles de routage hiérarchique parmi lesquels on peut aussi citer :

II.2.6.1 Cluster-Based Routing Protocol (CBRP)

Les drones peuvent être organisés avec des réseaux en grappe. Le CBRP est basé sur la zone géographique, qui est divisée en plusieurs grilles carrées. Chaque grille contient un membre de la grappe, dont un drone fera office de CH, comme le montre la **figure II-7**. Les drones des membres du cluster fournissent les données au CH pour les transférer à la station de base. L'avantage ici est la réduction des frais généraux, et il n'est pas nécessaire de découvrir les

routes, et donc, d'enregistrer les tables de routage ; CH est le responsable du routage des données. Pour optimiser l'opération de routage et l'inondation des messages, des schémas de regroupement peuvent être utilisés. Il peut être intégré dans n'importe quel protocole de routage réactif, proactif ou géographique. Il convient à la fois à la transmission à courte et à longue distance. Le regroupement minimise également le trafic de découverte de routes à la demande en utilisant le GPS pour la localisation géographique.[21]

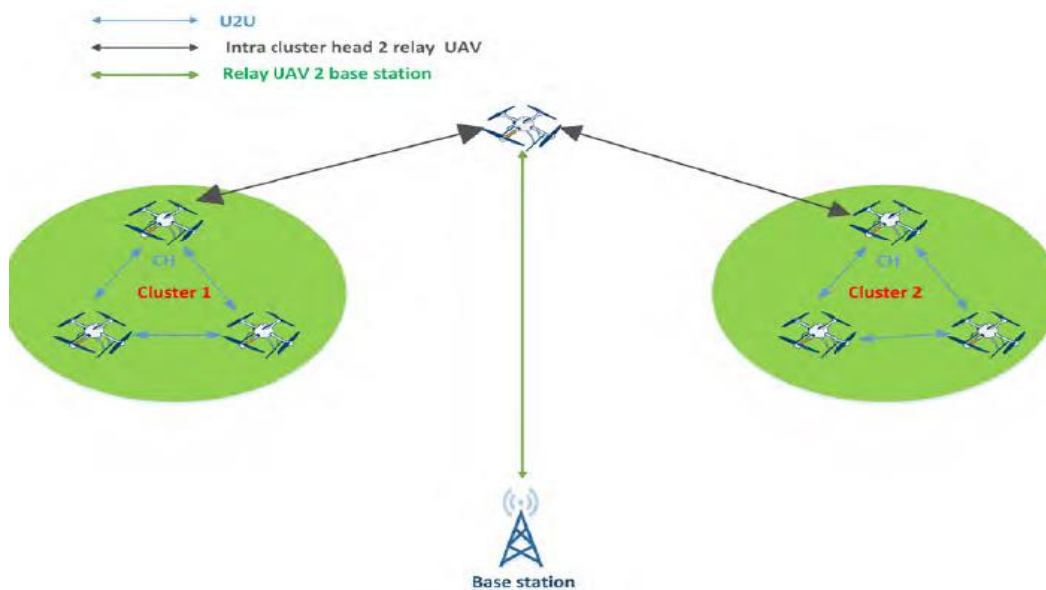


Figure II-7: CBRP[21]

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents protocoles de routages utilisés dans les réseaux FANETs pour bien comprendre leur mode de fonctionnement et combler éventuellement leurs limites. Un état de l'art est essentiel, d'une part pour concevoir un nouveau protocole basé sur les caractéristiques existantes, et d'autre part pour proposer une solution efficace afin de résoudre certains défis et d'améliorer les performances du réseau. Ces performances dépendent de plusieurs paramètres, notamment le modèle de mobilité et l'environnement, afin de concevoir un protocole de routage efficace.

Chapitre III : L'intelligence artificiel

III.1 Introduction

Le concept de l'intelligence artificielle (IA) est de faire penser les machines « comme des humains » ; en d'autres termes, effectuer des tâches telles que raisonner, planifier, apprendre et comprendre notre langage. Bien que personne ne s'attende à l'heure actuelle, ni même dans un avenir proche, à une équivalence parfaite avec l'intelligence humaine, l'IA a des incidences importantes sur nos vies. Le « cerveau » sur lequel s'appuie l'IA est une technologie appelée apprentissage automatique (ou *machine learning*), lequel a été conçu pour nous rendre plus productif et faciliter notre travail. Il est nécessaire de commencer par présenter ces méthodes puis d'expliquer les manières les plus simples de les mettre en œuvre. Dans ce chapitre, nous allons parler des concepts de base de la logique floue entre autre : la définition, l'historique, la structure, le fonctionnement, la classification, les caractéristiques, et les avantages de la logique floue.

III.2 La logique floue

III.2.1 Définition

La commande floue a pour but de gérer automatiquement un processus en fonction d'une consigne, par action sur des variables de commande, elle possède des caractéristiques et des avantages intrinsèques qui sont [25] :

- Le non nécessite d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- L'utilisation de connaissance ;
- La simplicité de définition et de conception ;
- La robustesse de la commande et la possibilité de commande non linéaire ;
- La réduction du temps de développement et de maintenance ;

III.2.2 Historique

Les bases de la théorie de la logique floue ont été formulées par le professeur L.A.ZADAH en 1965, c'est en 1974 que le professeur MAMDANI ,en définissant la structure de base des régulateurs flous et les principes de la commande floue ,propose la première application industrielle ,la commande floue d'un générateur de vapeur .En 1985 la logique floue s'est implantée réellement dans le milieu industriel en montrant toute son efficacité [25].

III.2.3 Principe de base de la logique floue

III.2.3.1 Notion d'appartenance partielle

Dans [26] les auteurs ont rapportés que dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$.

Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont *nets*, tandis que pour les ensembles flous les contours sont *graduels*, ou encore *flous* comme l'illustre la **figure III-1** [27]:

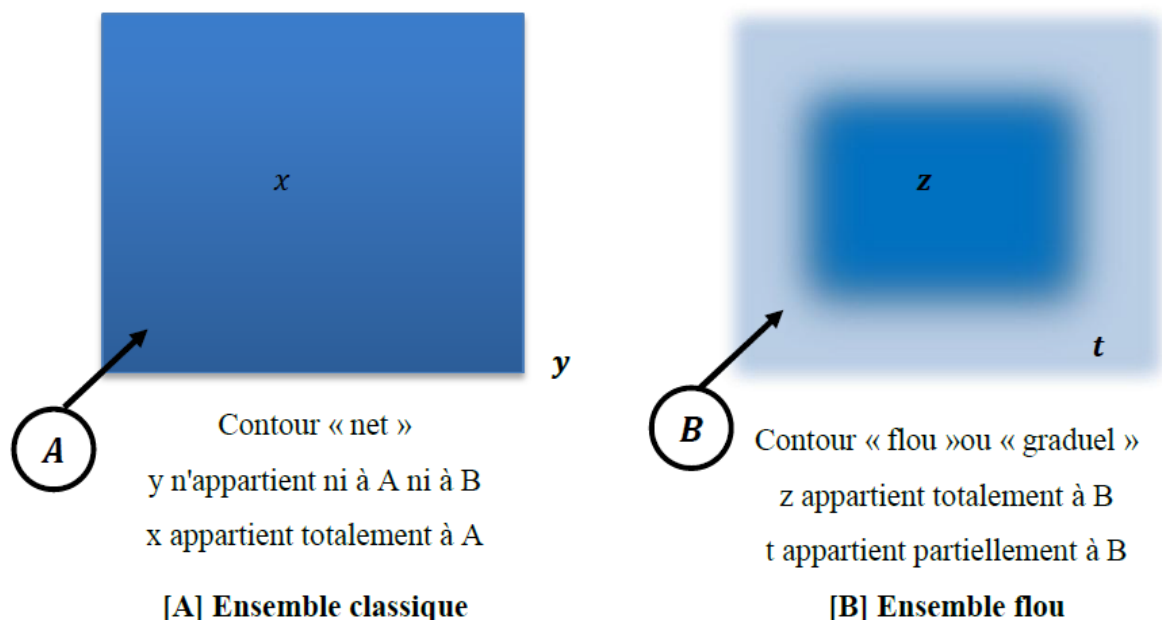


Figure III-1: Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

A ce titre, on associe aux ensembles classiques la logique binaire dite encore booléenne, et aux ensembles flous la logique floue. Ces deux logiques ne s'opposent pas, au contraire il apparaît comme nous le verrons plus loin, que la logique floue est une extension de la logique binaire pour laquelle les niveaux de vérité (degrés d'appartenance que l'on note μ), au lieu d'être vrai ou faux peuvent prendre des valeurs comprise entre 0 et 1.

Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, présentons un exemple simple.

Un patient atteint d'hépatite présente généralement les symptômes suivants :

- Le patient a une forte fièvre,
- Sa peau présente une coloration jaune,
- Il a des nausées.

Comment modéliser l'état : "a une forte fièvre" ?

- Représentation booléenne

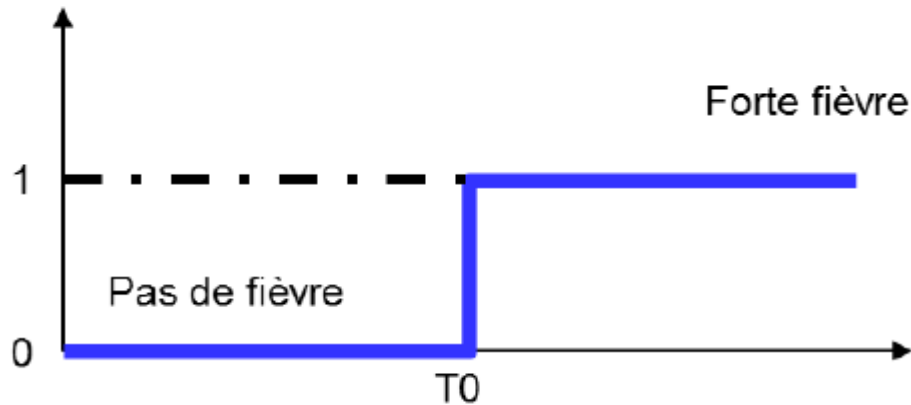


Figure III-2 : Représentation des variables booléenne classique.

La variable booléenne ci-dessus tente de représenter cet état.

- En deçà de la température T0, le patient n'a pas de température.
- Au-delà, il doit consulter !

Donc comment quantifier T0 lorsque le phénomène est complexe?

La notion de fièvre est typiquement une notion floue difficilement modélisable avec l'algèbre booléenne classique.

- La variable "à une forte fièvre" manipulée par la logique floue serait la suivante :

La transition entre les valeurs faux (codée 0) et vrai (codée 1) est maintenant **progressive**.

Comme la figure suivante :

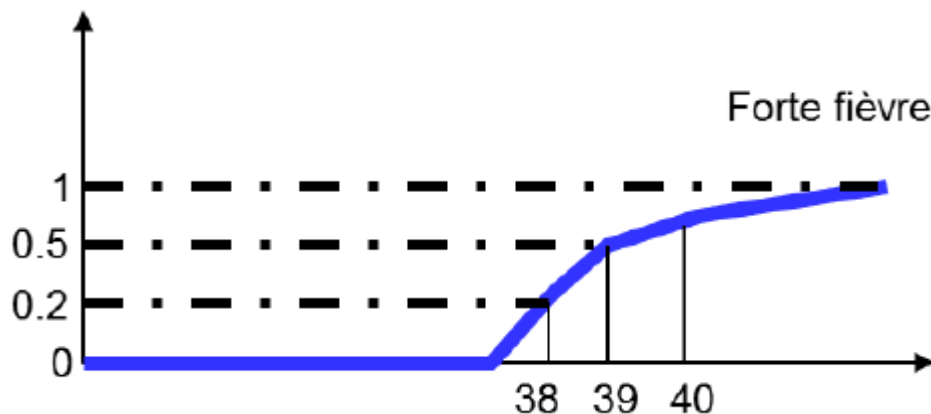


Figure III-3: Représentation des variables floues.[27]

- La fonction représentée doit être considérée comme un **degré d'appartenance** μ à l'état décrit ou comme une **probabilité d'appartenir à l'ensemble** considéré.
- Ainsi, un patient présentant une température de 38 n'a qu'un faible degré d'appartenance 20 % (0,2) à l'état "a une forte fièvre" alors que celui qui atteint 40 présente un fort degré d'appartenance (80 %) à ce même état.
- On voit qu'il est maintenant beaucoup plus aisé de fixer la température de basculement (progressif) d'état. A 39, on n'appartient qu'à 50 % à l'état "a une forte fièvre".

Si l'on reprend l'exemple du diagnostic médical, pour un patient dont la température aurait été juste inférieure à la température de transition (38,9 et 39 °C), on aurait exclu l'hépatite alors qu'avec la logique floue, on l'aurait envisagée avec une probabilité moyenne, mais non nulle de 50 % !

Cette représentation sur la **figure III-3** est appelé *fonction d'appartenance*, elle illustre la gradualité introduite par la logique floue.

La fonction d'appartenance est désignée par $\mu_A(x)$. L'argument x se rapporte à la variable linguistique, tandis que l'indice A indique l'ensemble concerné.

$\mu_A(x)$, associée à l'ensemble A représentant la forte fièvre. Si $\mu_A(x)$ est égal à '1' alors il est sûr et certain que x est dans A , $\mu_A(x)$ est égal à '0' implique que sûr et certain x n'appartient pas à A , $\mu_A(x)$ est strictement entre 0 et 1 implique que x appartient à A avec un degré de vérité égal à $\mu_A(x)$. A est donc l'ensemble flou associé à la valeur linguistique forte fièvre. A sera noté par [27] :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \text{ et } x \in X\} \quad [3.1]$$

Si X est discret, A est noté par :

$$A = \sum_x \mu_A(x)/x \quad [3.2]$$

Si X est continu, A est noté par:

$$A = \int \mu_A(x)/x \quad [3.3]$$

Où $\mu_A(x)$ est la fonction d'appartenance à A et X est l'ensemble de toutes les valeurs possibles de x (l'univers de discours de x).

III.2.3.2 Univers de discours

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x et $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A. Plus généralement, le domaine de définition de $\mu_A(x)$ peut être réduit à un sous ensemble de l'univers de discours. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue x [27].

III.2.3.3 Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique, elle permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou [26]. En toute généralité, une fonction d'appartenance d'un ensemble flou est désignée par $\mu_A(x)$. L'argument x se rapporte à la variable caractérisée, alors que l'indice A indique l'ensemble concerné. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes [27]:

- Monotones (croissantes ou décroissantes) ;
- Triangulaires ;
- Trapézoïdales ;
- En forme de cloche (Gaussiennes) ;

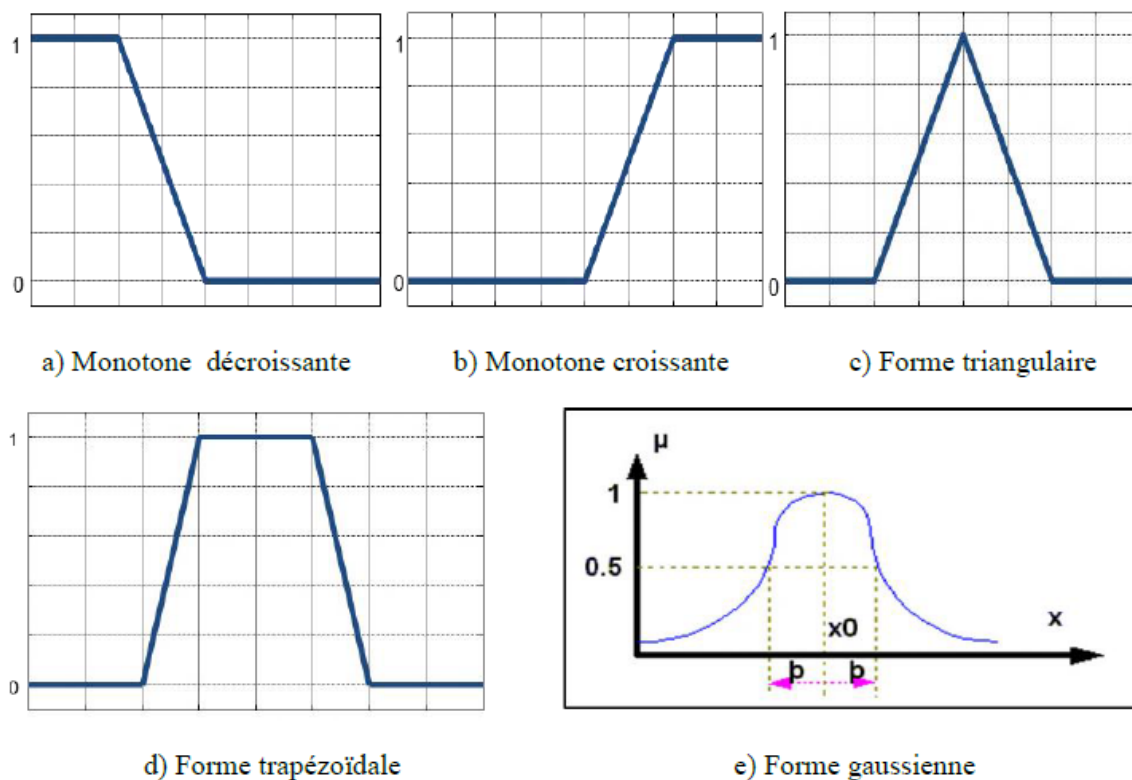


Figure III-4: Différentes formes des fonctions d'appartenance.[27]

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire.

III.2.3.4 Variable linguistique

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc." . Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue. On peut représenter une variable linguistique par un triplé (x, U, T_x) tels que : x est une variable numérique (Vitesse, Taille, Température) définie sur un univers de référence U , T_x est un ensemble de catégories floues de U , qui sont utilisées pour caractériser x à l'aide de fonctions d'appartenance [27]. Considérons la vitesse de rotation d'une machine électrique comme une variable linguistique définie sur un univers de discours $UD = [0,100]$ rd/s, et son ensemble de catégories floues $T_{\text{vitesse}} = (\text{Lente}, \text{Rapide}, \text{Moyenne})$. Ces trois ensembles flous de T_{vitesse} peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance comme le montre la **figure III-5** [27].

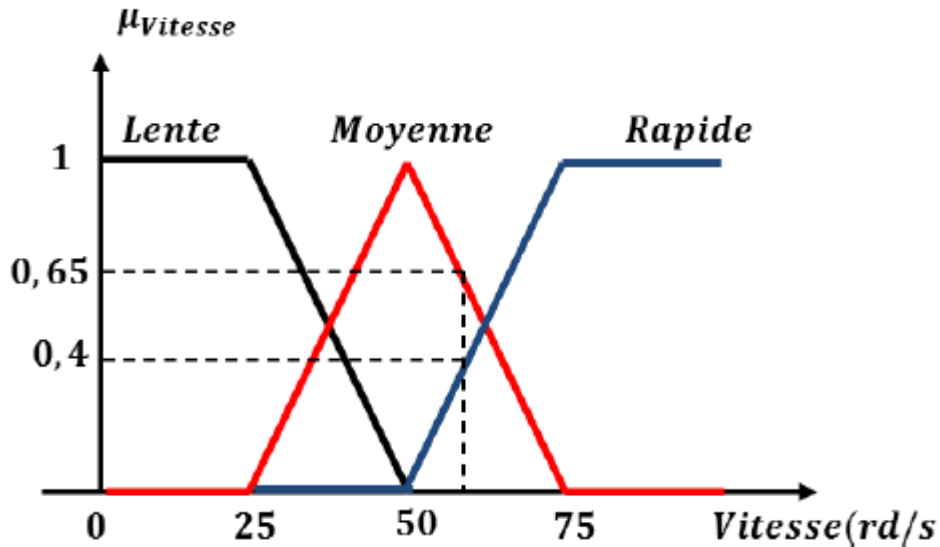


Figure III-5 :Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique.[27]

III.2.3.5 Propriétés des ensembles flous [27]

III.2.3.5.1 Égalité

Deux ensembles flous A et B de X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de X:

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad [3.4]$$

III.2.3.5.2 Inclusion

Un ensemble flou A est inclus dans un ensemble flou B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de B sur tout le domaine X.

$$\forall x \in X, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad [3.5]$$

III.2.3.5.3 Support

Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle.

$$Supp(A) = \{x \in X \Rightarrow \mu_A(x) \neq 0\} \quad [3.6]$$

III.2.3.5.4 Hauteur

La hauteur d'un ensemble flou A est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine X. Un ensemble flou A est dit *normal* si $h(A)=1$.

$$h(A) = \max_{x \in X} \mu_A(x) \quad [3.7]$$

III.2.3.5.5 Noyau

Le noyau d'un ensemble flou A est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à A (leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1).

$$Kern(A) = \{x \in X \Rightarrow \mu_A(x) = 1\} \quad [3.8]$$

III.2.3.5.6 Cardinal

Le cardinal d'un ensemble flou A est la somme des fonctions d'appartenance (cf. ensemble classique).

$$|A| = card(A) = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \quad [3.9]$$

III.2.3.5.7 Partition floue

Soit N ensembles flous A_j du référentiel X. $(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N)$ est dite une partition floue si :

$$\forall x \in X \sum_{j=1}^N \mu_{A_j}(x) = 1, \text{ avec } A_j \neq \emptyset \text{ et } A_j \neq X \forall 1 \leq j \leq N \quad [3.10]$$

La **figure III-6** illustre un exemple d'une partition floue formée de trois ensembles flous.

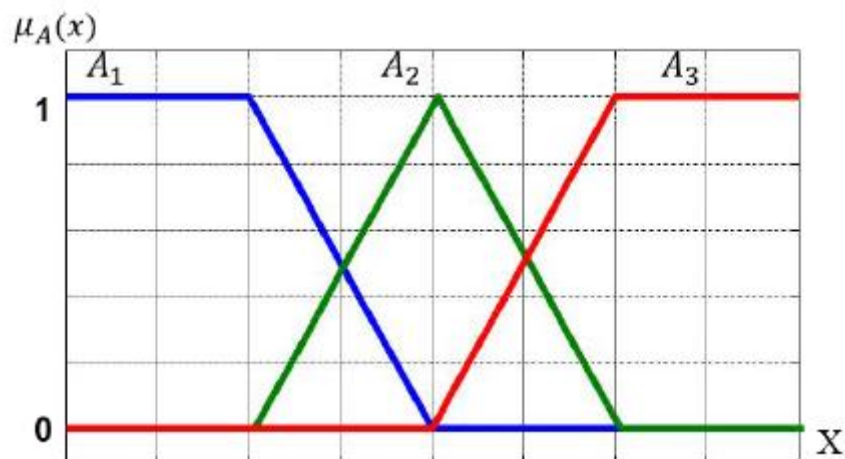


Figure III-6 :Exemple d'une partition floue formée de trois ensembles flous [27]

III.2.3.6 Opérateurs de la logique floue

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup

à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels [28]. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduites par les opérateurs "ET", "OU", et "ALORS" respectivement. Soient A et B, deux sous-ensembles flous d'une variable linguistique définis sur l'univers de discours UD par leurs fonctions d'appartenance μ_A et μ_B respectivement. Les rôles de chaque opérateur peuvent être résumés comme suit [27] :

III.2.3.6.1 Opérateur ET (Intersection floue)

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles A et B est défini par les éléments x de l'univers de discours UD qui appartiennent à A et à B.

Dans la logique floue, l'opérateur ET peut être exprimé par :

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in UD \quad [3.11]$$

$$\text{Ou bien } \mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in UD \quad [3.12]$$

On parle alors d'opérateur minimum. Cette opération est représentée à la **figure III-7** Comme on le voit, il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_{A \cap B}(x)$ n'atteigne pas la valeur 1. On peut facilement vérifier que l'opérateur minimum est commutatif, c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ sans que le résultat change.

Cet opérateur peut être appliqué à plus de deux ensembles. Dans ce cas s'applique le théorème d'associativité.

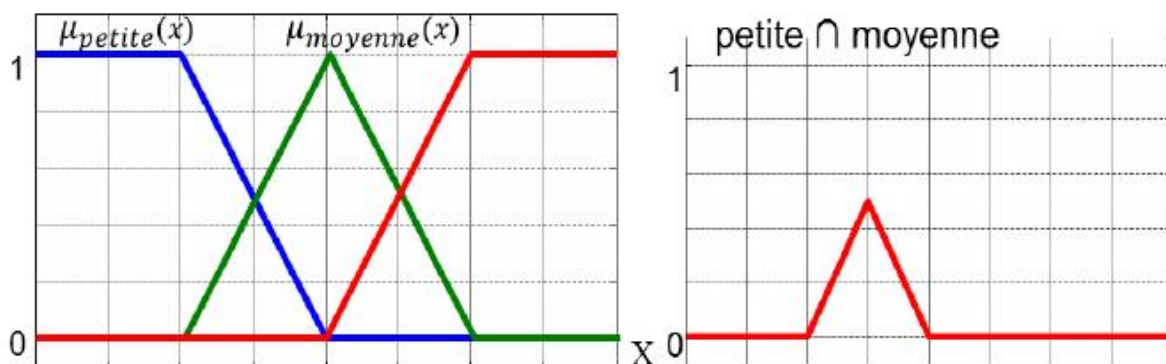


Figure III-7: Opérateur ET

III.2.3.6.2 Opérateur OU (Union floue)

Le sous-ensemble flou correspondant à l'union des sous-ensembles A et B est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par tous les éléments x de UD qui appartiennent ou bien à

A ou bien à B, ce que l'on note $A \cup B$. L'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum, que l'on exprime comme suit :

$$\mu_{A \cap B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in UD \quad [3.13]$$

Ou bien $\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad \forall x \in UD \quad [3.14]$

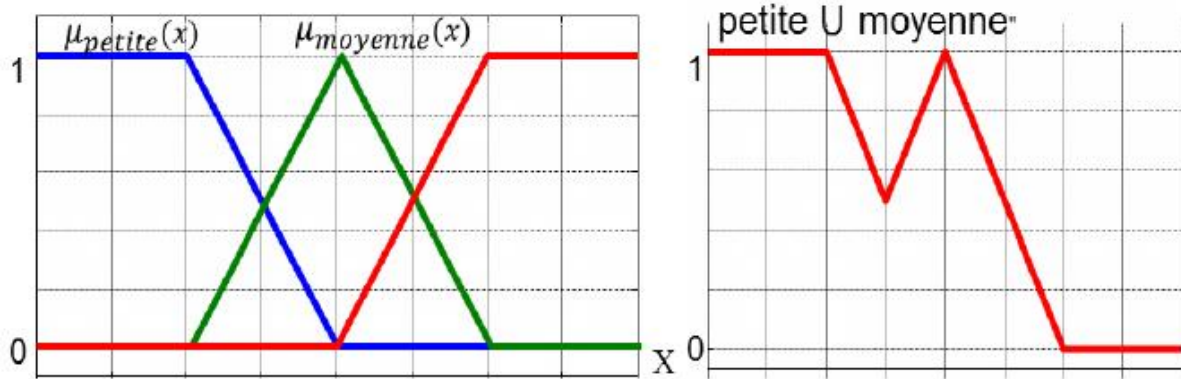


Figure III-8: Opérateur OU

III.2.3.6.3 Opérateur NON (complémentation floue)

Comme l'illustre la **figure III-9**, le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble A est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments x de l'UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou A. On peut exprimer ça par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad \forall x \in UD \quad [3.15]$$

Le complément flou représente l'opération NON de la logique classique au sens flou.

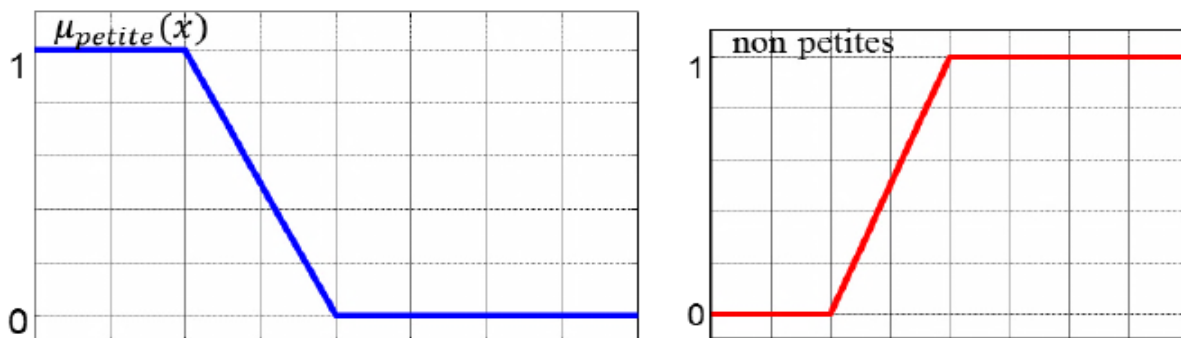


Figure III-9: Opérateur NON

III.2.3.7 Règles d'inférence floue

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent pour prendre des décisions la connaissance humaine présentée sous forme de règles floues, appelées aussi règles d'inférence. Elles sont exprimées sous la forme [27]:

SI (*prémisse*) **ALORS** (*conclusion*).

Nous aurons par exemple :

Si (*pression forte ET température élevée*) **ALORS** (*ouverture vanne grande*)

Dans [26] la règle floue est défini comme une combinaison entre une condition, nommée (prémisse ou prédicat) qui dépendra de plusieurs variables liées entre elles par des opérateurs ET, OU, NON et une *conclusion* ou *conséquence*. Les prémisses et conclusions forment des propositions floues exprimées par une conjonction ou une disjonction de prédicats, les conclusions sont obtenues par implication des propositions floues.

Ainsi en logique floue, on interprète la règle suivante : SI x est A alors y est B par le fait que si la variable floue x appartient au sous-ensemble A avec un degré d'appartenance $\mu_A(x)$, alors y appartient au sous-ensemble flou B avec un degré d'appartenance $\mu_B(y)$ qui dépend de la validité $\mu_A(x)$ de la prémisse. Plus généralement, l'expertise est donnée sous forme d'un ensemble de z règles, désigné par le terme de système d'inférence flou (SIF), présenté par une énumération du type [27]:

SI [(Prédicat 1) **ET/OU** (Prédicat 1') **ET/OU**] **ALORS** (Conclusion 1) **OU**

SI [(Prédicat 2) **ET/OU** (Prédicat 2') **ET/OU**] **ALORS** (Conclusion 2) **OU**

.... **OU**

SI [(Prédicat z) **ET/OU** (Prédicat z') **ET/OU**] **ALORS** (Conclusion z)

L'opérateur OU n'est pas utilisé dans les conclusions car il introduirait une incertitude dans la connaissance, l'expertise ne permettrait pas de déterminer quelle décision à prendre [26]. De même, l'opérateur NON n'est pas employé, en effet si une règle avait par exemple la conclusion: «*ALORS pression NON forte*», il serait impossible de dire si cela signifie «*pression faible*» ou «*pression moyenne*», cela serait encore un cas d'incertitude. Quatre étapes sont donc nécessaires pour obtenir la conclusion finale [27]:

- le calcul des propositions ;
- le calcul des relations ;
- les compositions des règles avec les faits observés ;

- l'agrégation des conclusions des règles.

III.2.4 Structure d'un système de commande floue

La logique floue est principalement utilisée dans les domaines de prise de décision, de reconnaissance des formes, de modélisation et de commande des procédés. La commande ou la régulation des systèmes est le domaine industriel de la logique floue le plus exploité. On distingue trois structures majeures de régulateurs à logique floue (RLF) [29]:

- La structure pure ;
- La structure de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) ;
- La structure de Mamdani ou le modèle « fuzzification - défuzzification ».

Dans la structure pure les variables d'entrée et de sortie du RLF sont des variables floues ou linguistiques. Ceci constitue un handicap étant donné que les entrées et les sorties des régulateurs des systèmes réels sont des variables réelles ou numériques.

La structure TSK résout ce problème par une simple transformation des variables linguistiques en variables réelles. L'inconvénient de cette structure est que le conséquent de chaque règle soit une formule mathématique.

Mamdani s'est proposé une interface de défuzzification (défuzzificateur) à la sortie de la structure pure. Le fuzzificateur transforme les variables réelles d'entrée en variables linguistiques floues, tandis que le défuzzificateur effectue l'opération inverse. La structure de Mamdani est devenue le modèle standard du RLF le plus utilisé dans la régulation des systèmes. Comme l'illustre la **figure III-10**, l'architecture de Mamdani est constituée de quatre parties essentielles à savoir [29] :

- L'interface de fuzzification (le fuzzificateur) ;
- La base de connaissance ;
- Le mécanisme d'inférence ou l'évaluation de règles ;
- L'interface de défuzzification (le défuzzificateur).

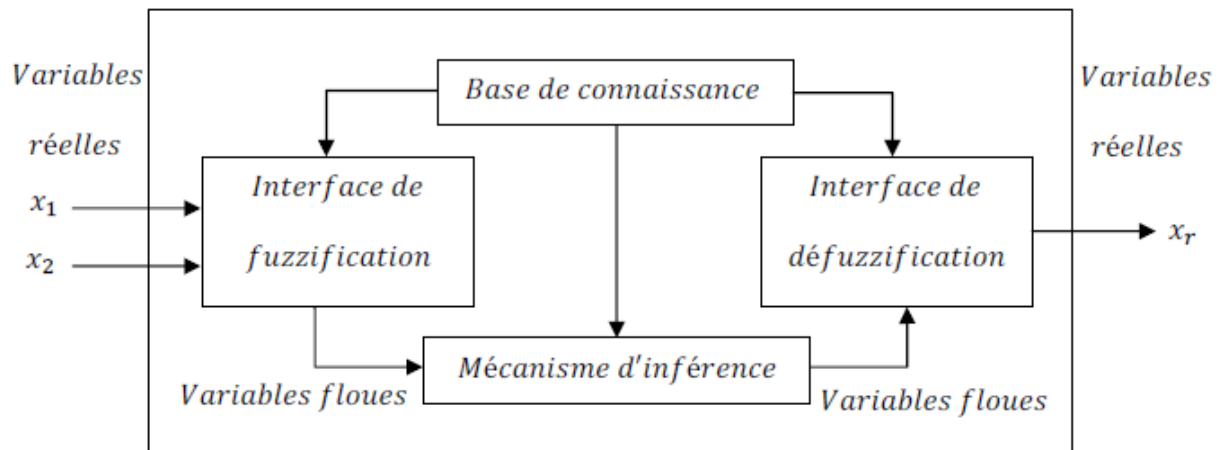


Figure III-10: Structure de base du régulateur flou RLF.[29]

Comme le système à commander ne reçoit que des valeurs déterministes (non floues), un RLF devrait convertir les valeurs déterministes à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertir le signal de commande de valeurs floues en valeurs déterministes pour appliquer au procédé. Les rôles de chaque bloc peuvent être résumés comme suit [30] :

III.2.4.1 Interface de fuzzification

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Etablit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;
- Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1, 1]$ afin de faciliter le calcul.

III.2.4.2 Base de connaissance

Le bloc base de connaissance comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Il consiste en « *base de données* » et en « *base de règles linguistiques (floues) de commande* » :

- La base de données effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un RLF ;
- La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques.

III.2.4.3 Inférence floue

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement :

- la méthode d'inférence max-min ;
- la méthode d'inférence max-produit ;
- et la méthode d'inférence somme-produit ;

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs flous :

- Pour la méthode d'inférence max-min, l'opérateur *ET* est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur *OU* est réalisé par la formation du maximum, et *ALORS* (l'implication) est réalisée par la formation du minimum.
- Pour la méthode d'inférence max-produit, l'opérateur *ET* est réalisé par la formation du produit, l'opérateur *OU* est réalisé par la formation du maximum, et *ALORS* (l'implication) est réalisée par la formation du produit.
- Pour la méthode d'inférence somme-produit, on réalise au niveau de la condition, l'opérateur *OU* par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur *ET* par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur *ALORS* est réalisé par un produit.

III.2.4.4 Interface de défuzzification

La défuzzification consiste à déduire une valeur numérique précise de la sortie du régulateur (x_r) à partir de la conclusion résultante floue ($\mu_{RES}(x_r)$) issue de l'opération d'inférence. Les méthodes couramment utilisées sont :

- La méthode de centre de gravité ;
- La méthode du maximum ;
- La méthode des surfaces ;
- La méthode des hauteurs.

On présente dans ce qui suit l'une des méthodes les plus utilisées, qui sont la méthode du centre de gravité. Cette méthode donne généralement de meilleurs résultats malgré l'exigence d'une

grande puissance de calcul. Elle consiste à prendre comme décision à la sortie l'abscisse x_{Gr} du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_r)$. Cette abscisse est déterminée par la relation suivante :

$$x_{Gr} = \frac{\int x_r \mu_{RES}(x_r) dx_r}{\int \mu_{RES}(x_r) dx_r} \quad [3.16]$$

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases nécessaires à la compréhension des méthodes à base de logique floue. Les systèmes flous sont à l'évidence meilleurs que les systèmes linéaires à partir du moment où ils génèrent des résultats assez proches du raisonnement humain, sous réserve d'avoir au préalable bien défini les trois parties qui structurent son fonctionnement, à savoir : la modélisation des données d'entrées en variables linguistiques grâce à des fonctions d'appartenances, la définition d'une liste de règles d'inférences qui représentent les connaissances que l'on a du système et enfin, le choix de l'opérateur logique utilisé et le type de Défuzzification choisie. De nombreuses possibilités d'utilisation de ces techniques sont envisageables rien qu'en ce qui concerne les FANETs.

Après l'analyse et l'étude des protocoles de routage, et de l'intelligence artificielle, dans le prochain chapitre nous allons expliquer notre scénario et valider nos résultats par simulation.

Chapitre IV : Simulations et interprétations

IV.1 Introduction

Les FANETs connaissent une expansion importante grâce à plusieurs moyens qui ont pu se développer au cours du temps, donc il est coûteux de déployer une flotte de drones pour valider et vérifier un protocole du réseau ou un certain algorithme spécifique. C'est pour cela que les simulateurs de réseaux sont utilisés.

La simulation des réseaux offre beaucoup d'économie, de temps et d'argent pour l'accomplissement des tâches de simulation, ils sont également utilisés pour que les concepteurs des protocoles du réseau puissent tester les nouveaux protocoles ou modifier les protocoles déjà existants d'une manière contrôlée et productive.

L'objectif de ce chapitre est de présenter notre scénario puis de proposer ensuite une solution efficace de choisir le cluster head en intégrant la logique floue pour la décision afin de savoir s'il s'agit vraiment d'un choix optimal ou non.

Nous présentons dans ce qui suit le déroulement des étapes de simulation que nous avons menés dans ce PFE.

IV.2 Le choix du logiciel

Il existe une variété de simulateur Parmi lesquels on peut citer : MATLAB, NS2, NS3 etc. Puisque nous voulons utiliser l'IA (l'intelligence artificielle) pour notre scénario, le choix du MATLAB est le plus raisonnable car nous avons tout un toolbox spécialement pour la logique floue.

IV.3 Présentation de MATLAB

MATLAB est un logiciel commercial de calcul numérique/scientifique, visualisation et programmation performant et convivial développé par la société The MathWorks Inc. À ne pas confondre cependant avec les outils de calcul symbolique ou formel (tels que les logiciels commerciaux Maple, ou le logiciel libre Maxima). Le nom de MATLAB vient de MATrix LABORatory, les éléments de données de base manipulés par MATLAB étant des matrices de dimension quelconque (tableaux n-D, pouvant se réduire à des matrices 2D, vecteurs et scalaires) qui ne nécessitent ni déclaration de type ni dimensionnement (*typage dynamique*). Contrairement aux langages de programmation classiques (scalaires), les opérateurs et fonctions MATLAB permettent de manipuler directement ces tableaux (donc la plupart du

temps sans programmer de boucles), rendant ainsi MATLAB particulièrement efficace en calcul numérique, analyse et visualisation de données en particulier.

Mais MATLAB est aussi un environnement de développement (*progiciel*) à part entière : son langage de haut niveau, doté notamment de structures de contrôles, fonctions d'entrée-sortie et de visualisation 2D et 3D, outils de construction d'interface utilisateur graphique (GUI)... permet à l'utilisateur d'élaborer ses propres fonctions ainsi que de véritables programmes (*M-files*) appelés scripts vu le caractère interprété de ce langage.

MATLAB est disponible sur les systèmes d'exploitation standards (Windows, GNU/Linux, Mac OS X...). Le champ d'application de MATLAB peut être étendu aux systèmes non linéaires et aux problèmes associés de simulation avec le produit complémentaire SIMULINK. Les capacités de MATLAB peuvent en outre être enrichies par des fonctions plus spécialisées regroupées au sein de dizaines de *toolbox* (boîtes à outils qui sont des collections de *M-files*) couvrant des domaines nombreux et variés tels que :

- Analyse de données, analyse numérique ;
- Statistiques ;
- Traitement d'image, cartographie ;
- Traitement de signaux et du son en particulier ;
- Acquisition de données et contrôle de processus (gestion ports série/parallèle, cartes d'acquisition, réseau TCP ou UDP) ;
- logique floue ;
- finance etc...

Une interface de programmation applicative (API) rend finalement possible l'interaction entre MATLAB et les environnements de développement classiques (exécution de routines C ou Fortran depuis MATLAB, ou accès aux fonctions MATLAB depuis des programmes C ou Fortran). Ces caractéristiques (et d'autres encore) font aujourd'hui de MATLAB un standard incontournable en milieu académique, dans la recherche et l'industrie [31].

IV.4 Notre scénario

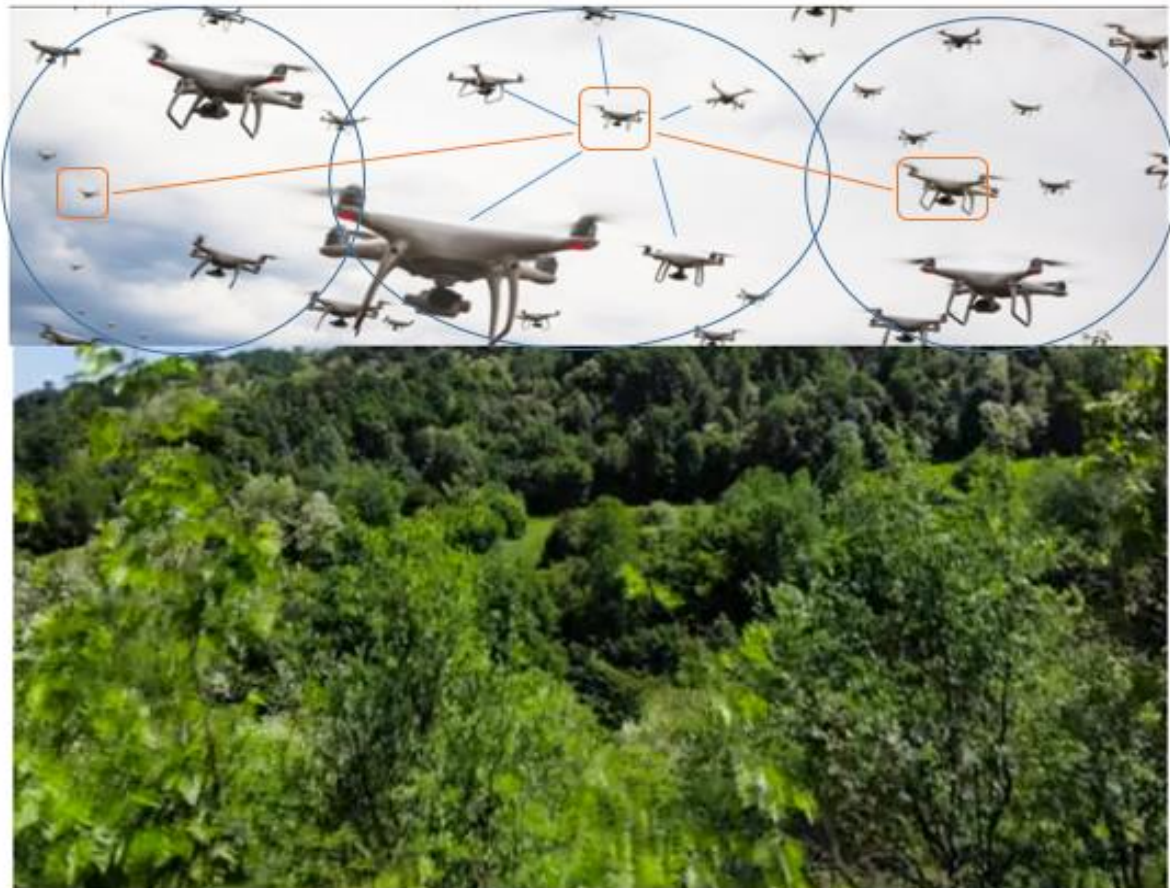


Figure IV-1 : surveillance d'une forêt par une flotte de drone

- CH : Drone cluster head
- : communication sans fil entre CH et Membre
- : communication sans fil entre CH et CH ou entre CH et SB

Le but de notre scénario est la surveillance d'une forêt assez dense et de transmettre les informations en temps réel dans la station de base.

Pour couvrir la couverture de cette forêt, nous sommes dans l'obligation de faire une collaboration de drone pour avoir une couverture assez large, car un seul drone ne suffira jamais à parcourir une forêt assez dense. Dans notre scénario, nous avons opté pour trois flottes de drones qui coopèrent pour échanger et relayer des informations entre eux afin de surveiller les environnements ouverts et sauvages à la recherche de la vie après un incendie par exemple.

Nous pouvons projeter notre scénario au feu de forêt récemment déclenché en Australie (juin 2019 au 08 mars 2020). Au 14 janvier 2020 les rapports font état d'environ 18.6 million d'hectares brûlés, 5900 bâtiments détruits (dont 27779 habitations) et au moins 34 morts[32].

La direction de la sécurité civile en France travaille depuis quelques années sur l'utilisation des drones pour identifier les compteurs d'une catastrophe en temps réel. Le déploiement d'une flotte de drones collaboratifs avec des mécanismes de routage ad hoc pourrait être une des solutions possibles pour mettre en place ce type d'applications. Mais il faut deux observations : d'abord une détection et ensuite une confirmation afin d'être sûr que les pompiers peuvent être envoyés sur la zone incendiée. Cependant, cette solution devra faire face à de nombreux défis, notamment la grande mobilité des drones, le maintien de la connectivité mais le plus important est le choix du drone chargé de la transmission des données vers la station de base. Ainsi les drones auront une durée de vie maximale.

Notre objectif ici est de remédier à ces problèmes. Puisque la problématique est la couverture assez large et en plus d'avoir une transmission en temps réel et la conservation de la durée de vie des drones au maximum, nous avons opté pour le routage en clustering. Le but des clusters est de diviser les drones en groupes, chaque groupe sera dirigé par un cluster head (CH), qui sera capable de communiquer à n'importe quel moment avec ses membres (m) ou bien avec les clusters heads voisins et aussi avec la station de base (SB).

Le choix du cluster est très important dans les protocoles de routage en clustering. Suivant notre état de l'art détaillé dans le chapitre 2, nous avons opté d'intégrer l'intelligence artificielle pour le choix de CH. Le but de l'IA est d'avoir un maximum de paramètres pour le choix de notre cluster Head car nous avons jugé qu'un seul paramètre reste très insuffisant pour le choix du CH. L'intelligence artificielle nous permettra de réaliser ce choix en se basant sur les paramètres qui sont :

- **L'énergie** : c'est l'un des paramètres le plus important dans les FANETs car elle est directement liée à l'autonomie de vol des drones.
- **La stabilité**: ce paramètre peut affecter la qualité de la communication car elle est directement liée à la vitesse des drones.
- **Connectivité** : est un paramètre très important car elle affecte la qualité de la communication. Si la connectivité est mauvaise alors la communication sera désastreuse.

De plus, dans les réseaux ad hoc de drones, chaque drone a la possibilité de se déplacer selon un plan de vol préprogrammé. Chacun des drones possède certaines caractéristiques principales comme une vitesse moyenne de déplacement, un niveau de batterie, un champ de vision et des moyens de communications. En plus le CH possède les informations sur l'environnement

(comme la carte du milieu forestier et les coordonnées de la zone incendiée) et a la possibilité de communiquer, non seulement avec la base mais aussi avec tous les autres CH. Le CH sera l'unique responsable des routages dans son cluster.

IV.5 Intégration de la logique floue dans la simulation pour le choix du CH:

Ces dernières années avec l'application de plus en plus répandue des véhicules aériens sans pilote (UAV), la technologie de réseau des drones a également suscité des inquiétudes. Dans le cadre d'une mission il est nécessaire que la connexion soit maintenue afin d'éviter tous les effets indésirables. D'autre part son besoin de garantir la QoS augmente par le temps avec les révolutions dans les réseaux FANETs, c'est les raisons pour lesquelles nous avons penché vers l'intégration de l'intelligence artificielle pour mieux améliorer les performances des FANETs.

IV.5.1 Notre système d'inférence floue

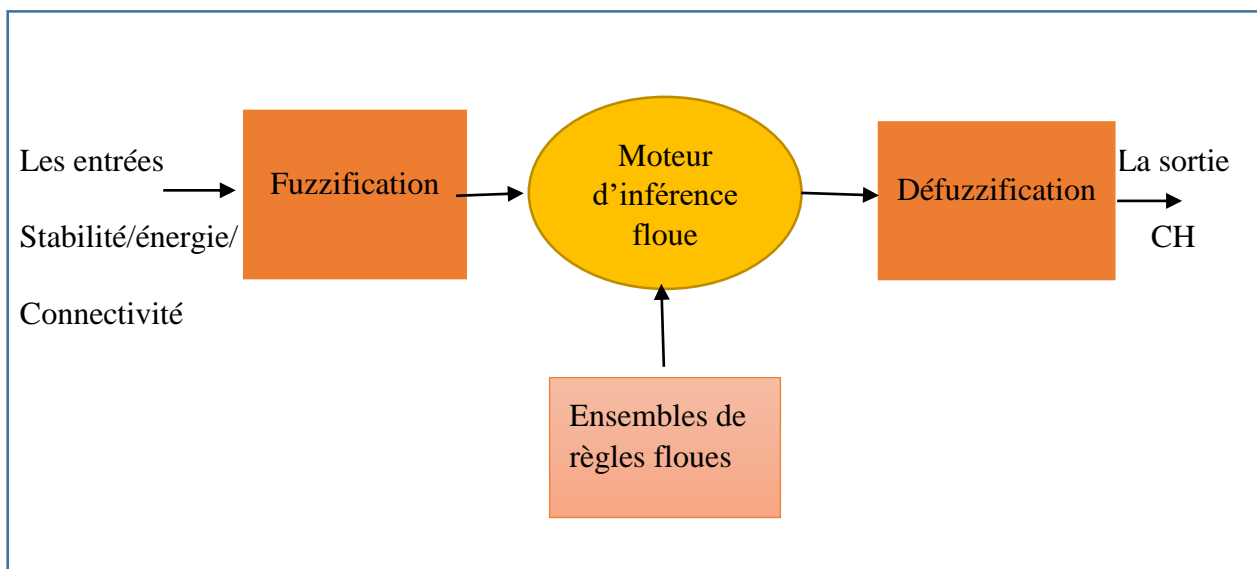


Figure IV-2 : processus d'inférence floue.

La figure IV-2 illustre la structure du processus d'inférence floue qui se compose de quatre parties à savoir la fuzzification, base de règles floues, moteur d'inférence floue et la défuzzification. Le processus d'inférence floue contient trois paramètres d'entrée (stabilité-énergie-connectivité) et un paramètre de sortie, ce qui est une valeur approximative :

- La stabilité est lié à la métrique de la vitesse, qui est une mesure importante car elle peut affecter la qualité de la communication / transmission. C'est cette mesure qui indique la vitesse à laquelle les drones se déplacent, modifiant par conséquent la topologie du réseau à l'approche ou à la distance d'une zone particulière. . Pour la variable, trois valeurs linguistiques ont été définies: vitesse faible (plage de 0 à 5 m / s), vitesse

moyenne (plage de 4 à 13 m / s) et vitesse élevée (lorsque la vitesse est supérieure à 11 m / s).

- L'énergie, directement liée à la capacité de la batterie de l'appareil, est une autre mesure importante; elle est liée au temps pendant lequel l'UAV pourra survoler et surveiller une région particulière. Plus la capacité de la batterie est élevée, plus la portée de vol est longue et, par conséquent, plus la route et la topologie du réseau resteront actives. Cette métrique est divisée en trois valeurs linguistiques qui sont: plage basse (0 à 600 secondes), plage moyenne (600 à 1 200 secondes) et plage haute (plus de 1 200 secondes).
- La troisième et dernière métrique utilisée est la connectivité. Plus la connectivité est grande, plus la communication entre les drones est meilleure. Inversement, plus la connectivité est petite, pire est la communication entre les drones. Pour la variable, trois valeurs linguistiques ont été définies : plage basse (0 à 10), plage moyenne (10 à 20) et plage haute (plus de 20).

Les variables d'entrée sont collectées pour le système flou intégré, qui sur la base d'un tableau de règles et de la machine d'inférence, indiquera le choix optimal pour le CH.

IV.5.2 Ensemble des règles floues et le moteur d'inférence

L'ensemble des règles floues permet de donner toutes les relations possibles entre les fonctions d'appartenances des 3 paramètres d'entrée et la sortie, elles ont une forme de condition Si-Alors. Puisque chaque paramètre a trois fonctions d'appartenance donc nous pouvons avoir $3^3 = 27$ possibilités des règles floues. **Le tableau IV-1** contient un ensemble de règles floues définies pour exécuter le système flou. Grâce à cet ensemble de règles et en conjonction avec le moteur d'inférence implémenté, le système trouve la décision la plus appropriée pour sélectionner le CH, améliorant et maintenant ainsi les performances du réseau.

Stabilité	Energie	Connectivité	sortie
Elevée	Faible	Faible	Mauvais
Elevée	Faible	Moyen	Mauvais
Elevée	Faible	Elevée	Mauvais
Elevée	Moyen	Faible	Mauvais
Elevée	Moyen	Moyen	Bon
Elevée	Moyen	Elevée	Excellent
Elevée	Elevée	Faible	Mauvais
Elevée	Elevée	Moyen	Bon
Elevée	Elevée	Elevée	Excellent
Moyen	Faible	Faible	Mauvais
Moyen	Faible	Moyen	Mauvais
Moyen	Faible	Elevée	Mauvais
Moyen	Moyen	Faible	Mauvais
Moyen	Moyen	Moyen	Bon
Moyen	Moyen	Elevée	Excellent
Moyen	Elevée	Faible	Mauvais
Moyen	Elevée	Moyen	Bon
Moyen	Elevée	Elevée	Excellent
Faible	Faible	Faible	Mauvais
Faible	Faible	Moyen	Mauvais
Faible	Faible	Elevée	Mauvais
Faible	Moyen	Faible	Mauvais
Faible	Moyen	Moyen	Mauvais
Faible	Moyen	Elevée	Mauvais
Faible	Elevée	Faible	Mauvais
Faible	Elevée	Moyen	Mauvais
Faible	Elevée	Elevée	Mauvais

Tableau IV-1 : les règles floues

Pour le moteur d'inférence floue nous avons choisi la méthode de Mamdani pour l'agrégation entre les fonctions d'appartenances :

$$\mu_{CH} = \max[\mu_{stabilité}, \mu_{energie}, \mu_{connectivité}] \quad [4.1]$$

Pour la défuzzification nous avons choisi la méthode de centre de gravité :

$$CH = \frac{\int x \mu_{CH}(x) dx}{\int \mu_{CH}(x) dx} \quad [4.2]$$

Après le choix du SIF (système d'inférence floue), nous avons fait la fuzzification de nos 3 entrées dans le but d'avoir le degré d'appartenance de chaque paramètre.

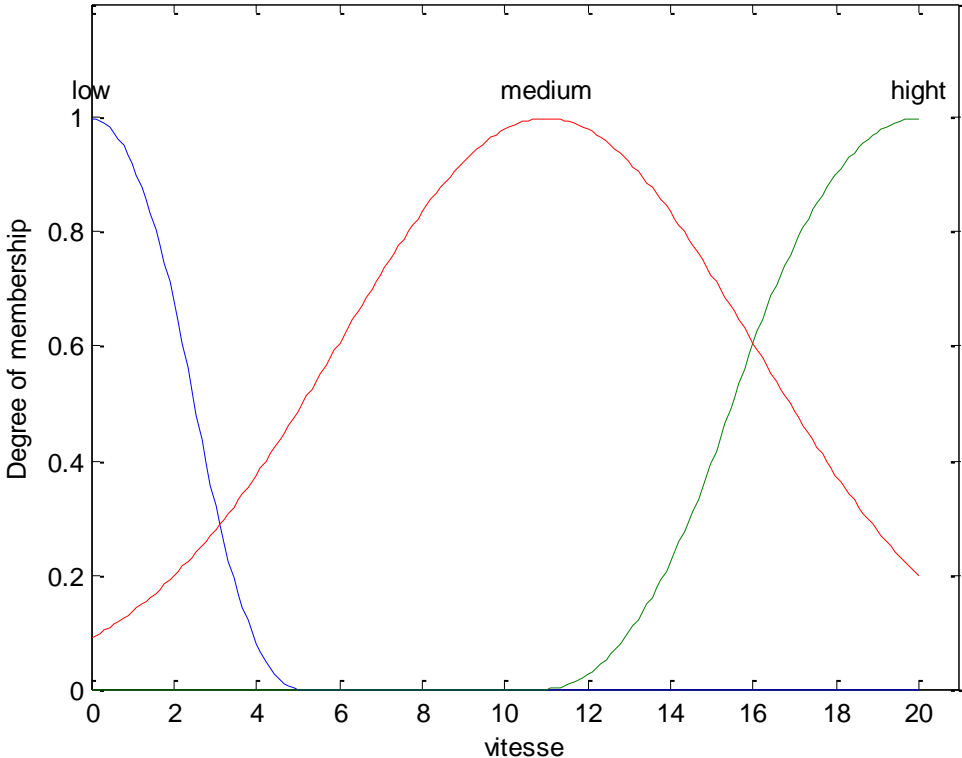


Figure IV-3 : fonction d'appartenance de la stabilité

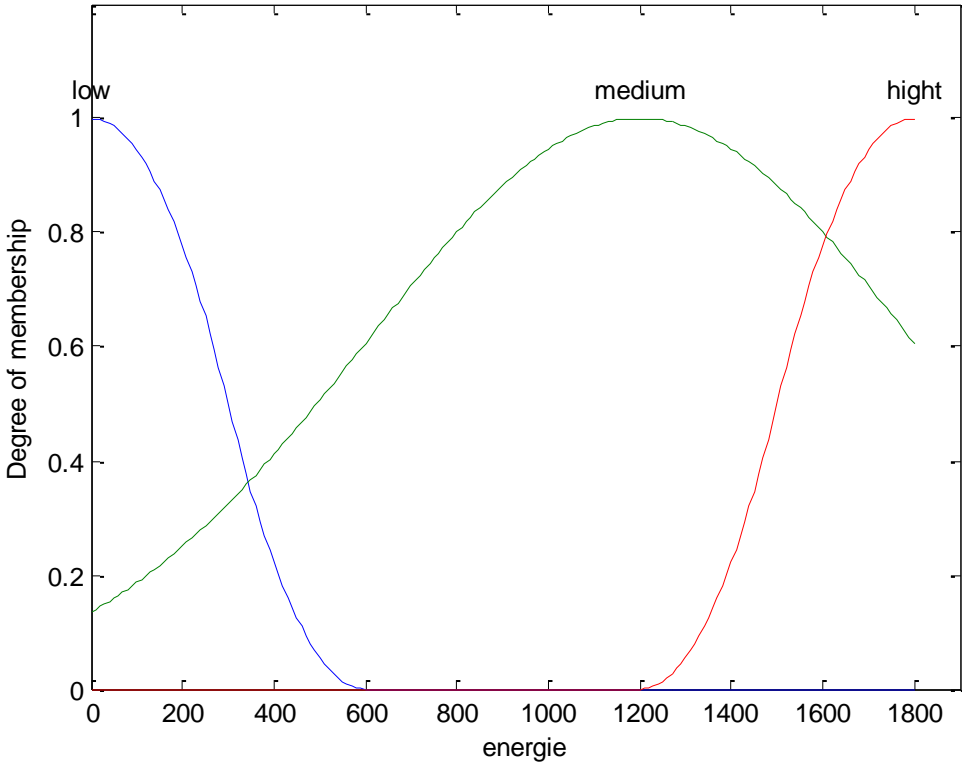


Figure IV-4 : fonction d'appartenance de l'énergie.

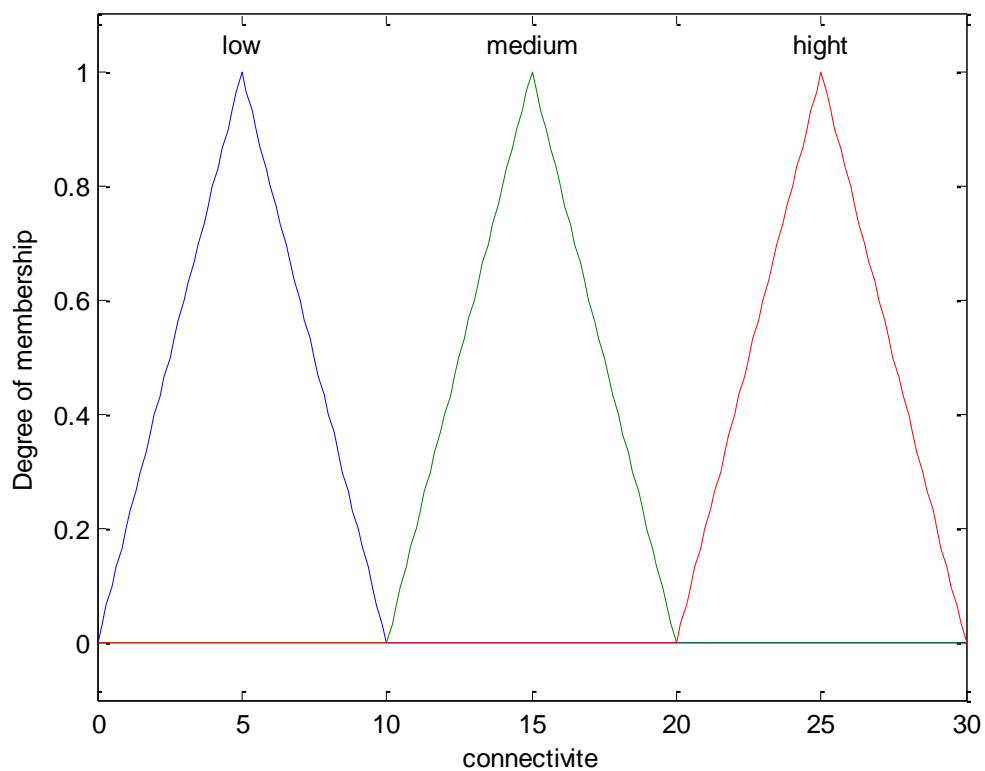


Figure IV-5 : fonction d'appartenance de la connectivité

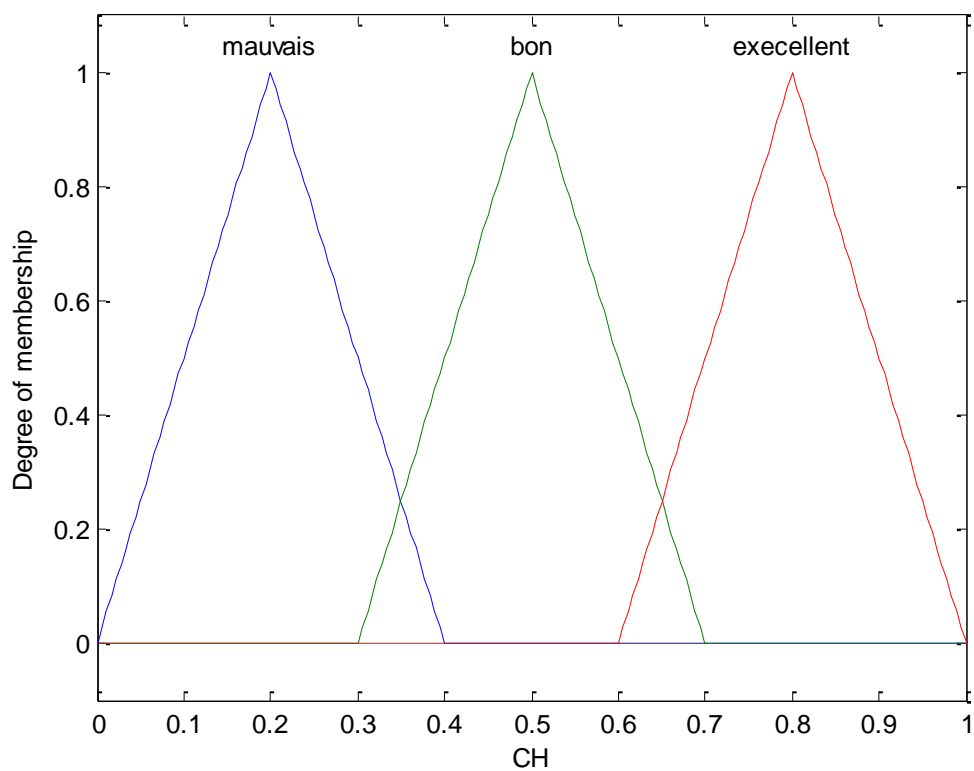


Figure IV-6 : fonction d'appartenance de la sortie CH

Les figures IV-3, IV- 4, IV-5 et IV-6 montrent respectivement les degrés d'appartenances des entrées et de la sortie CH, nous constatons que chaque figure contient trois fonctions d'appartenance. Pour les deux premiers paramètres d'entrées (stabilité et énergie), nous avons choisis de les présenter par la forme Z pour les niveaux faibles, la forme gaussienne pour les niveaux moyens et la forme S pour les niveaux élevés. Pour le 3ème paramètre d'entrée (la connectivité) et la sortie (CH) nous avons choisi la forme triangulaire pour les présenter. Nous aurions pu choisir d'autres formes comme la forme gbel et trapèze mais tout dépend du scénario que nous voulions schématiser.

IV.6 Résultats et discussions

Après la simulation nous allons essayer d'interpréter les résultats obtenus.

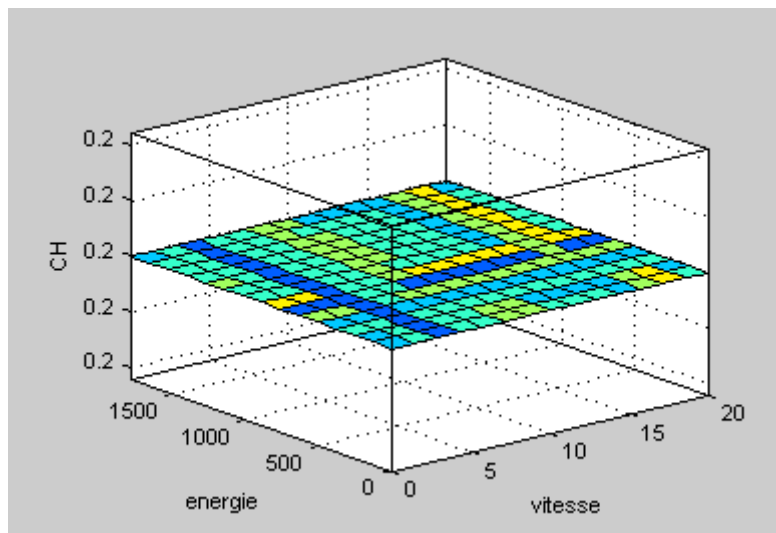


Figure IV-7 : La représentation 3D du choix de CH pour une faible connectivité

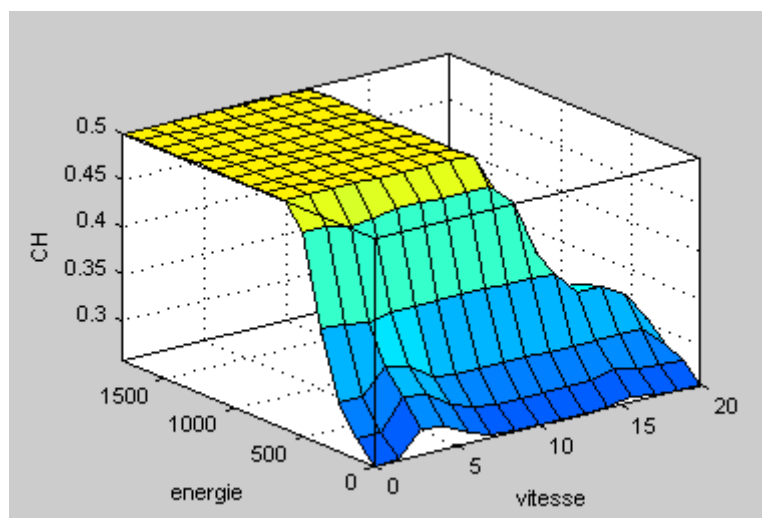


Figure IV-8 : La représentation 3D du choix de CH pour une connectivité moyenne

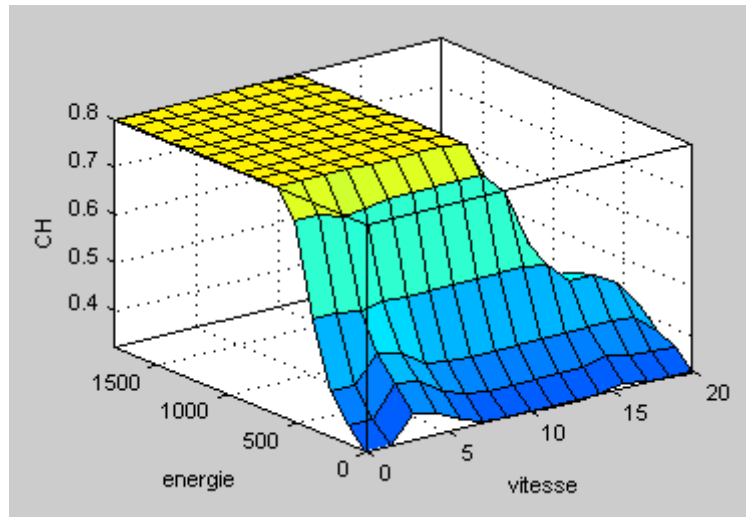


Figure IV-9 : La représentation 3D du choix de CH pour une forte connectivité

Les **figures IV-7, IV- 8 et IV-9** illustrent la représentation 3D de la sélection du cluster head. Nous remarquons qu'un drone ayant une faible connectivité (0 à 10) au sein du cluster n'est pas un choix optimal, quelle qu'en soit son autonomie de vol et sa vitesse. Ceci est dû au fait que le CH est responsable de tous les protocoles au sein du cluster et à ce titre il doit avoir au moins une bonne connectivité avec ses membres comme le montre la **figure IV-8**. Par contre un drone ayant une forte connectivité (**figure IV-9**) est le choix le plus optimal dans la mesure où sa vitesse n'est pas trop élevée et aussi que son énergie n'est pas trop faible. Ce qui nous amène à conclure que :

- le choix le plus optimal est un drone avec une faible vitesse, une énergie élevée et une connectivité élevée.
- Un drone ayant une faible vitesse, une énergie élevée et une connectivité moyenne peut être considéré comme un bon choix.
- Un drone ayant une vitesse élevée ou une connectivité faible ou encore une énergie faible ne sera pas élu comme CH car c'est un choix désastreux.

Comme déjà discuté dans l'état de l'art le choix du cluster head est le plus grand problème dans le protocole de routage hiérarchique. Plusieurs auteurs ont essayé de trouver une solution efficace pour le choix du cluster head dans les réseaux FANETs comme dans [18],[17],[12]. Mais si nous prenons par exemple l'article de Park et al [18] ils ont essayé trois approches :

- D'abord la sélection a été faite de façon aléatoire
- ensuite avec l'énergie

- et au final ils ont utilisé une approche hybride (notamment à travers l'énergie et la distance avec la station de base). Ils ont prouvé par la suite que cette dernière approche est beaucoup plus efficace par rapport aux deux précédentes approches. Leur résultat était acceptable car ils avaient 70% d'efficacité en termes de la durée de vie des drones.

Après l'analyse et l'interprétation des résultats de notre méthode nous avons fait une comparaison entre notre modèle et les modèles de sélection basés sur un seul paramètre puis sur deux paramètres pour le choix du CH comme le montre la **figure IV-10** :

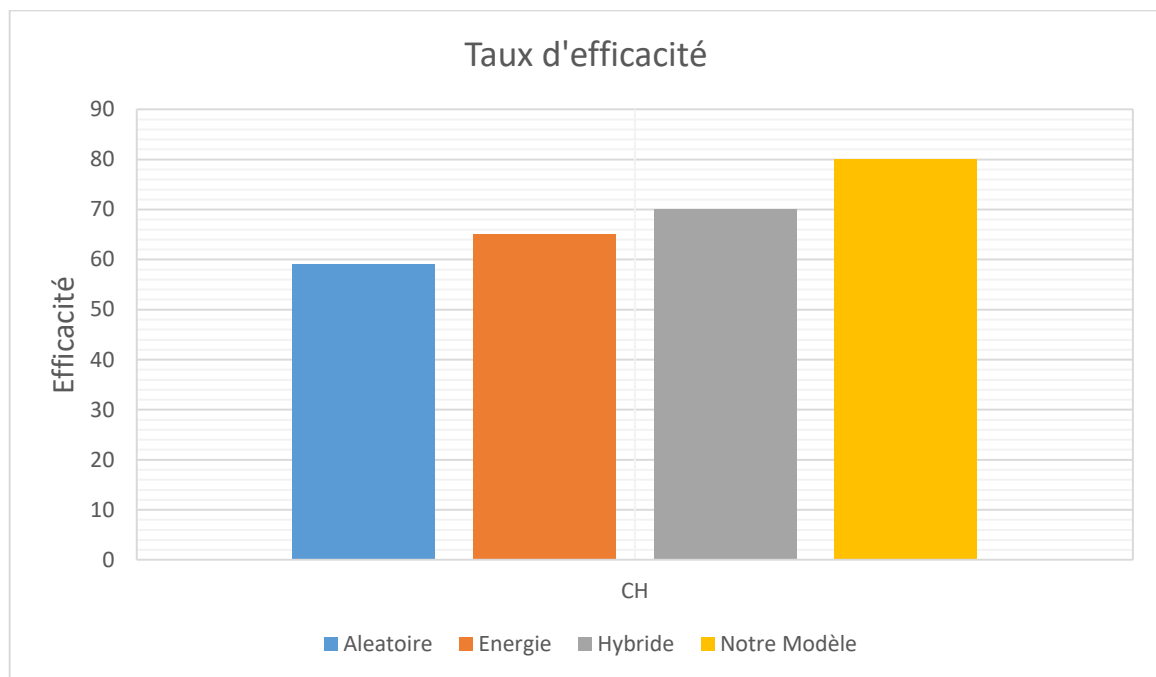


Figure IV-10: Comparaison des différents modèles

La **figure IV-10** illustre la comparaison entre notre modèle de sélection et les modèles de sélection déjà réalisés (c'est à dire les modèles de sélection effectués avec un seul paramètre puis avec deux paramètres). Nous remarquons que notre modèle propose 80% d'efficacité en termes de la durée de vie des drones tandis que les trois autres modèles proposent respectivement 59%, 65%, et 70% d'efficacité. Cette performance est réalisée grâce à l'intégration de la logique floue mais aussi et surtout parce que la sélection a été faite à l'aide des trois paramètres que nous avons jugé pertinents, pour maintenir une bonne communication dans le réseau ad hoc des drones.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée de notre scénario qui consiste à surveiller une région étendue à travers un protocole de clustering. Le choix du CH étant un

problème majeur dans ce type de routage, nous avons utilisé la logique floue qui nous a permis de faire un choix beaucoup plus optimal. Nous avons concentré nos discussions, nos simulations et nos interprétations, sur l'utilité de l'intelligence artificielle dans les FANETs. Les résultats ont été comparés à d'autre résultat et nous avons obtenu une amélioration considérable en termes d'autonomie de vol.

Enfin, l'intégration de l'intelligence artificielle dans les FANETs nous a permis de faire un choix optimal, d'avoir plus d'efficacité en termes d'énergie et de la durée de vie des drones et ainsi améliorer la communication au sein du réseau.

Conclusion générale

Les FANET offrent plusieurs avantages, mais il reste encore quelques défis à étudier, comme le routage entre les drones dans le réseau aérien. C'est pourquoi les réseaux aériens ont fait l'objet des recherches. Il n'existe pas de protocole de routage 100% efficace pour les réseaux aériens. Dans ce projet de fin d'étude, nous avons consacré un état de l'art sur les protocoles de routages existants dans les FANETs afin d'enrichir nos connaissances sur le problématique des FANETs. Notre contribution a été de proposer une nouvelle technique du choix du cluster head dans le protocole de routage hiérarchique. Cette approche consiste à utiliser la technique de la logique floue à trois entrées à savoir la connectivité, l'énergie et la stabilité. Nous avons jugé pertinents ces trois paramètres car ils sont selon nous indispensable pour maintenir une bonne communication dans les FANETs mais aussi pour améliorer la durée de vie des drones. Les résultats ont été comparés à d'autres résultats dans lequel la sélection avait été effectuée avec un seul paramètre et aussi avec deux paramètres. La comparaison a été faite par simulation et notre modèle a une meilleure performance par rapport aux autres modèles et cela grâce à l'intelligence artificielle.

Perspectives

Nous proposons comme perspective :

1. Essayer la sélection du cluster head avec quatre voire plus de paramètres d'entrées pour la machine de décision de la logique floue.
2. Essayer d'autres techniques d'intelligence artificielle afin d'améliorer beaucoup plus les performances des FANETs.
3. Une modélisation d'un algorithme de routage à base de notre modèle sous NS3. Puisque le module FANET n'existe pas sous NS3, l'idée de base est de modifier le module VANET et de l'adapter à notre scénario :
 - ✓ La modification du code source VANET en FANET
 - ✓ Implémentation d'un protocole de clustering sous NS3 (LEACH, CBRP...)
 - ✓ Implémentation d'une mobilité basée sur l'optimisation d'une particule de swarm (PSO)
 - ✓ Comparer ce protocole au traditionnel protocole de routage(AODV)

La figure ci-dessous schématise le logigramme de cette modélisation.

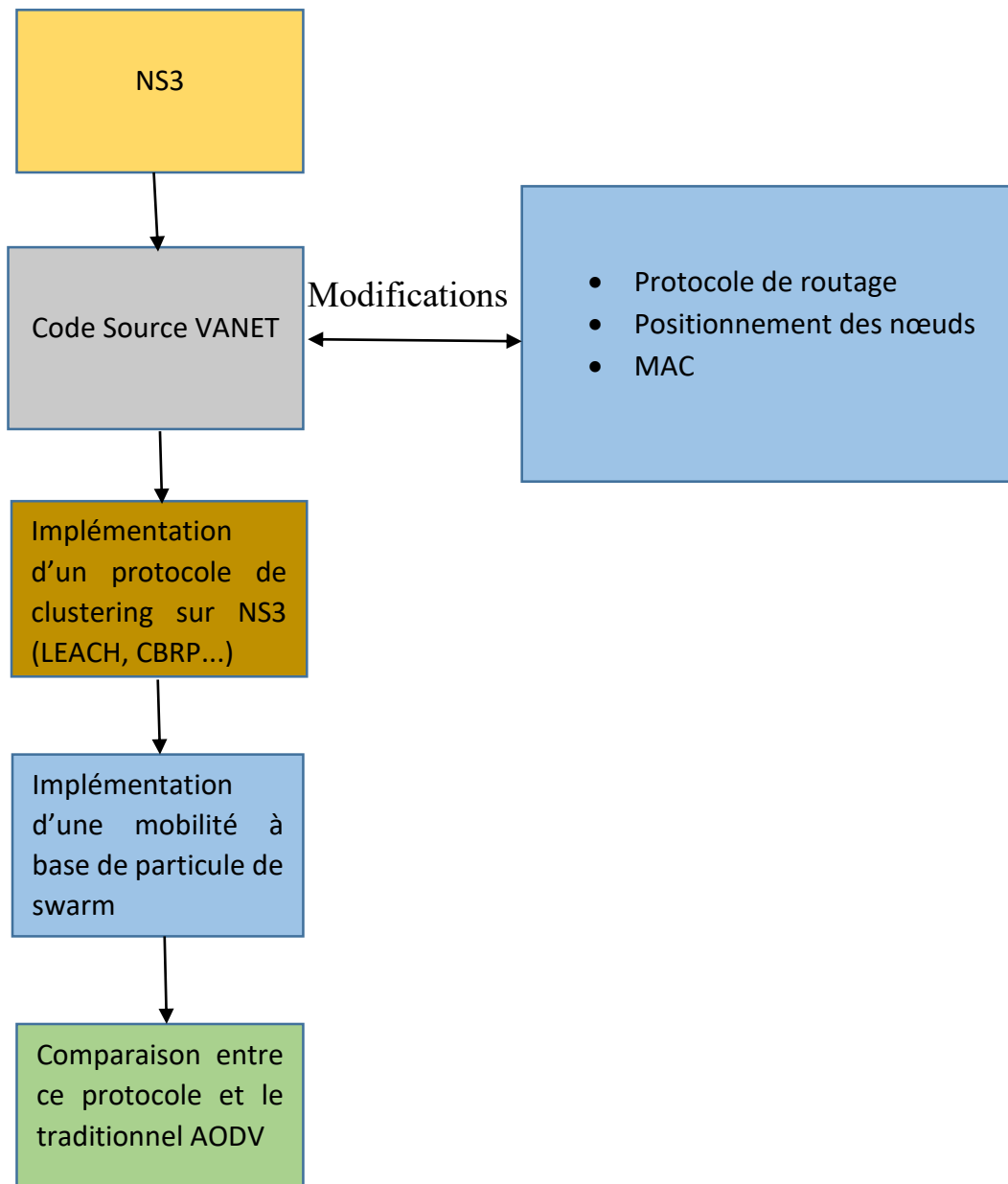


Figure IV-11: Le logigramme de notre algorithme proposé

Bibliographie

- [1] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270, 2013.
- [2] F. Morbidi, C. Ray, and G. L. Mariottini, "Cooperative active target tracking for heterogeneous robots with application to gait monitoring," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 3608-3613: IEEE.
- [3] B. Bethke, M. Valenti, and J. How, "Cooperative vision based estimation and tracking using multiple UAVs," in *Advances in cooperative control and optimization*: Springer, 2007, pp. 179-189.
- [4] M. Conti and S. Giordano, "Multihop Ad Hoc Networking: The Evolutionary Path," *Mobile Ad Hoc Networking*, vol. 35, no. 3, 2013.
- [5] J. Guerrero-Ibáñez, C. Flores-Cortés, and S. Zeadally, "Vehicular ad-hoc networks (vanets): architecture, protocols and applications," in *Next-generation wireless technologies*: Springer, 2013, pp. 49-70.
- [6] D. F. Astudillo Salinas, "Téléchargement de Contenus dans les réseaux véhiculaires," Université de Toulouse, 2013.
- [7] O. K. Sahingoz, "Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 74, no. 1-2, pp. 513-527, 2014.
- [8] R. Martínez-Val and C. Hernandez, "Preliminary design of a low speed, long endurance remote piloted vehicles (RPV) for civil applications," *Aircraft Design*, vol. 2, no. 3, pp. 167-182, 1999.
- [9] N. E. H. Bahloul, S. Boudjit, M. Abdennebi, and D. E. Boubiche, "A flocking-based on demand routing protocol for unmanned aerial vehicles," *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 263-276, 2018.
- [10] O. S. Oubbati, A. Lakas, F. Zhou, M. Güneş, and M. B. Yagoubi, "A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANETs)," *Vehicular Communications*, vol. 10, pp. 29-56, 2017.
- [11] K. Kumari, B. Sah, and S. Maakar, "A survey: different mobility model for FANET," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 5, no. 6, 2015.

- [12] W. Zafar and B. M. Khan, "A reliable, delay bounded and less complex communication protocol for multicluster FANETs," *Digital Communications and Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 30-38, 2017.
- [13] M. M. Mowla, M. A. Rahman, and I. Ahmad, "Assessment of Mobility Models in Unmanned Aerial Vehicle Networks," in *2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)*, 2019, pp. 1-4: IEEE.
- [14] W. Zafar and B. M. Khan, "Flying ad-hoc networks: Technological and social implications," *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 35, no. 2, pp. 67-74, 2016.
- [15] J. A. Maxa, "Architecture de communication sécurisée d'une flotte de drones," Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2017.
- [16] O. Bouachir, "Conception et mise en oeuvre d'une architecture de communication pour mini-drones civils," Université de Toulouse, 2014.
- [17] C. Zang and S. Zang, "Mobility prediction clustering algorithm for UAV networking," in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011, pp. 1158-1161: IEEE.
- [18] J.-H. Park, S.-C. Choi, H. R. Hussien, and J. Kim, "Analysis of dynamic cluster head selection for mission-oriented flying ad hoc network," in *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 2017, pp. 21-23: IEEE.
- [19] X. Li, T. Zhang, and J. Li, "A particle swarm mobility model for flying ad hoc networks," in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, pp. 1-6: IEEE.
- [20] M. A. Khan, A. Safi, I. M. Qureshi, and I. U. Khan, "Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols," in *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, 2017, pp. 1-9: IEEE.
- [21] M. Y. Arafat and S. Moh, "Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99694-99720, 2019.
- [22] B. Karp and H.-T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2000, pp. 243-254.
- [23] M. Hyland, B. E. Mullins, R. O. Baldwin, and M. A. Temple, "Simulation-based performance evaluation of mobile ad hoc routing protocols in a swarm of unmanned aerial vehicles," in *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07)*, 2007, vol. 2, pp. 249-256: IEEE.

- [24] R. L. Lidowski, B. E. Mullins, and R. O. Baldwin, "A novel communications protocol using geographic routing for swarming uavs performing a search mission," in *2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2009, pp. 1-7: IEEE.
- [25] T. Laamayad, "Intelligence artificielle," Cours E-learn, Université de Ouargla, 2015-2016.
- [26] F. Chevrie and F. Guély, "La logique floue," *Cahier technique*, vol. 191, 1998.
- [27] M.-T. Latreche, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien," 2018.
- [28] Y. Elbia, "Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté," Université de Batna 2, 2009.
- [29] B. Toual, "Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable," *Université de Batna*, vol. 2, 2010.
- [30] M. T. Cao, "Commande numérique de machines asynchrones par logique floue," Citeseer, Université Laval, 1997.
- [31] Jean-Daniel. *Introduction à MATLAB et GNU octave*. Available: <https://www.enacit1.epfl.ch>, (page consultée le 01/09/2020).
- [32] *Feux de brousse de 2019-2020 en Australie*. Available: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Feux_de_brousse_de_2019-2020_en_Australie, (page consultée le 01/09/2020).