

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Département d'Informatique et des Technologies de l'Information



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Informatique

Domaine : Informatique et Technologie de l'Information

Spécialité : Informatique Industrielle

Présenté par : - YAZI Mohamed bachir

- LAHRECH Abdennacer

Thème :

Nouveau modèle de mobilité

Pour le réseau de communication de véhicule aérien sans pilote

Approche basée sur les processus décisionnels de chaîne de Markov

Mémoire soutenu le 12 septembre 2021

Devant le jury composé de

Mr. DJEDIAI H'mida

Président

Mr. CHERADID Abdellatif

Encadreur

Mr. NEMLI Okba

Examineur

Année universitaire : 2020/2021



Remerciements

Initialement, ce mémoire n'aurait pas été réalisé sans la bénédiction du bon Dieu qui nous a donnée santé et volonté et nous a permis de nous instruire, Alhamd lillah .



*Nous tenons à remercier notre encadreur **Pr. CHERADID ABDELLATIF** pour ses précieux conseils et son engagement avec nos durant ce travail.*

Nous remercions Mr Khademalla Mohamed Ali.

Nous remercions également tous les membres de jury.

*Nous adressons nos remerciements au personnels du l'université de Ouargla, en particulier ceux de la faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
département de l'informatique.*

Nous ne pouvons conclure nos remerciements sans exprimer nos reconnaissances à tous ceux qui nous ont aidés et encouragés pour achever ce travail.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

À l'âme de mon cher père, que Dieu ait pitié de lui.

À ma chère mère, que Dieu la préserve.

À ma femme bien-aimée.

À mes frères et mes sœurs.

*À mes professeurs qui ont éclairé mon chemin vers
la réussite.*

À tous ceux qui ont contribué à ce mémoire.

Yazi Mohamed Bachir



Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
encouragements .

A mes frères .

A mes amies et mes camarades.

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du
Primaire, du moyen, du secondaire ou de
L`enseignement supérieur .

ADENNACER Lahrech

Résumé

Avec le développement technologique dans le domaine des drones et l'expansion croissante de leur utilisation dans divers domaines, le défi pour les développeurs est de rendre les drones 100% autonomes.

Aujourd'hui, un groupe multi-UAV peut accomplir diverses tâches en coordination les uns avec les autres, et ce grâce à un réseau de FANET.

Un processus de décision markov (PDM) est considéré comme l'un des moyens efficaces d'aider à la prise de décision. Au niveau du simulateur OMNet++, en utilisant l'algorithme d'itération de valeur de PDM, nous avons créé un nouveau modèle de mobilité pour le réseau de communication de véhicules aérien sans pilote qui améliore ses trajectoires en suivant le chemin le plus court d'une part et assure sa sécurité en évitant les sites dangereux d'autre part.

Mot clé : véhicules aérien sans pilote, drone, UAV, multi-UAV, FANET, PDM, OMNet++.

Abstract

With the technological development in the field of drones and the increasing expansion of their use in various fields, the challenge for developers is to make drones 100% autonomous.

Today, a multi-UAV group can accomplish various tasks in coordination with each other through a network of FANETs.

A Markov Decision Process (MDP) is considered to be one of the effective ways to aid in decision making. At the level of the Oment ++ simulator, using the value iteration algorithm of MDP, we have created a new mobility model for the unmanned aerial vehicles communication network that improves its trajectories by following the shortest path of on the one hand and ensures its safety by avoiding dangerous sites on the other hand.

Keyword : unmanned aerial vehicle, drone, UAV, FANET, MDP, OMNet++.

المخلص

مع التطور التكنولوجي الحاصل في مجال الطائرات بدون طيار وكذا التوسع المتزايد في استخدامها في شتى المجالات، أصبح الرهان بالنسبة للمطورين هو الوصول إلى مركبات جوية بدون طيار ذاتية القرار بنسبة 100%. اليوم أصبح بإمكان مجموعة من الطائرات بدون طيار إنجاز مختلف المهام بالتنسيق في ما بينها وهذا عن طريق شبكة FANET.

تعتبر قرارات عملية ماركوف (MDP) إحدى الوسائل الناجعة المساعدة في إتخاذ القرار . على مستوى المحاكي أومنت++ و بالاستعانة بخوارزمية تكرار القيمة الخاصة ب MDP قمنا بإنشاء نموذج جديد لحركة شبكة متصلة من الطائرات بدون طيار يقوم بتحسين مسارها بإتباع أقصر طريق من جهة و يضمن سلامتها بتجنب الأماكن الخطرة من جهة أخرى.

الكلمات المفتاحية : مركبة جوية بدون طيار، طائرة من دون طيار ،FANET، قرارات عملية ماركوف، أومنت++

Table des Matières

Table des matières

Liste des Figures	iii
Liste des Tableaux.....	iv
Liste des Abréviations.....	v
INRODUCTION GENERALE.....	01
Introduction Générale.....	02
Chapitre I : UAV et FANET.....	03
1. Introduction.....	04
2. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	06
2.1. Définition	06
2.2. Classification.....	06
2.2.1. Selon le type de voilure.....	06
a. Drone à voilures fixes	06
b. Drones à voilures battantes.....	07
c. Drones a voilures tournantes.....	07
2.2.2. Selon l'altitude et l'endurance.....	08
a. HALE (Haute AltitudeLongue Endurance).....	08
b. MALE (Moyenne Altitude Longue Endurance).....	08
2.2.3. En fonction de la masse et taille.....	09
a. Mini-drones.....	09
b. Micro-drones.....	09
2.2.4. La façon de décollage.....	09
a. UAV HTOL.....	09
b. UAVVTOL.....	09
2.2.5. drone hybride.....	09
2.3. Domaines d'application.....	10
a. Militaires.....	10
b. Civiles.....	11
3. Unmanned Aircraft System (UAS).....	11
3.1. Définition.....	11
3.2. Architecture d'un UAS.....	11
3.2.1. Véhicule aérien sans pilote (UAV).....	12
3.2.2. Charge utile (Payload)	12
3.2.3. Station sol (GCS).....	12
4. Multi UAV et flotte de drones.....	13
4.1. Avantages.....	13
4.2. Architecture de communication Multi-UAV.....	14
4.2.1. Communication centralisée.....	14
4.2.2. Réseau de communication cellulaire.....	15
4.2.3. Communication par satellite.....	15
4.2.4. FANET (Flying Ad-Hoc Networks).....	15
5. Flying Ad-Hoc Networks (FANET)	16
5.1. Définition.....	16
5.2. Caractéristiques.....	16
5.3. Architectures de communication.....	17
5.3.1. Réseau ad-hoc d'UAV	18
5.3.2. Réseau ad-hoc d'UAV multi-groupes.....	18
5.3.3. Réseau ad-hoc d'UAV multicouche.....	19
5.4. Technologie de communication.....	19

Table des Matières

5.5. Routage et protocoles de routage.....	21
5.6. Applications des FANETs	23
5.6.1. Coopération multi-UAV.....	23
5.6.2. Tâches UAV- sol.....	23
5.6.3. Collaborations UAV-VANET.....	24
5.7. Modèles de Mobilité.....	24
6. Projets multi-UAV de FANET.....	26
7. Conclusion	28
Chapitre II : Approches pour la planification et d'allocation des tâches coopératives pour un réseau multi-UAV Autonomes et hétérogènes.....	29
1. Introduction	30
2. Approche de programmation en nombres entiers.....	31
2.1. Introduction.....	31
2.2. Énoncé du problème.....	31
2.3. Solutions algorithmiques.....	32
3. Approche basée sur les processus décisionnels de chaine de Markov.....	34
3.1. Introduction.....	34
3.2. Énoncé du problème.....	35
a. MDP à horizon fini.....	35
b. MDP à horizon infini.....	36
3.3. Solutions algorithmiques.....	36
a. Dans le cas de l'horizon fini.....	36
b. Dans le cas de l'horizon infini.....	37
4. Approche basée sur les règles de la théorie des jeux.....	39
4.1. Introduction.....	39
4.2. Énoncé du problème.....	39
4.3. Solutions algorithmiques.....	40
5. Conclusion	42
Chapitre III : L'implémentation et Simulation.....	43
1. Introduction.....	44
2. La Simulation.....	45
3. Simulateur Réseau.....	45
3.2. GloMoSim.....	46
3.3. OMNeT++.....	46
3.3.1. Définition.....	46
3.3.2. Architecture d'OMNET++.....	47
4. Comparaison entre simulateurs réseaux.....	47
5. Framework INet.....	49
6. Implémentation.....	50
6.1. Principe de fonctionnement	51
6.2. Etude de Cas.....	52
7. Conclusion.....	54
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	55
Conclusion Générale.....	56
Références bibliographiques.....	57

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure 1 : Exemple de drone à voilures fixes.....	06
Figure 2 : La libellule artificielle.....	07
Figure 3 : Drones à voilures tournantes.....	08
Figure 4 : Des drones hybrides air-sol : (a) quadruple chasseur de char, (b) robot DALER, et (c) MALV.....	10
Figure 5 : Drones hybrides air-eau : (a) Hydroptère perroquet, (b) Drone de l'université Rutgers, (c) HexH20, et (d) AquaMAV.....	10
Figure 6 : Exemple d'architecture d'un UAS.....	13
Figure 7 : Architecture de communication Multi-UAV.....	14
Figure 8 : Architectures de communication FANET.....	18
Figure 9 : Taxonomie des protocoles de routage FANET.....	21
Figure 10 : GBPOS Algorithm (Global Best Particle Swarm Optimization).....	33
Figure 11 : Exemple de MDP.....	34
Figure 12 :L'architecture modulaire d'omnet++.....	47
Figure 13 : Sites à visités et les 05 UAV.....	50
Figure 14 : les quartes directions.....	50
Figure 15 : Schéma de principe de fonctionnement de l'application.....	51
Figure 16 : trajectoires dans le cas sans obstacles.....	52
Figure 17 : trajectoires dans le cas avec obstacles.....	53

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Différence entre MANET, VANET et FANET.....	17
Tableau 2 : Comparaison entre les technologies de communication FANET.....	20
Tableau 3 : Comparaison entre les modèles de mobilité.....	25
Tableau 4 : Exemple de Projets FANET existants.....	26
Tableau 5 : Comparaison entre Simulateurs réseaux.....	47
Tableau 6 : les sites de (départ/arrivée) pour chaque UAV.....	52

Liste des Abréviations

Liste des abréviations

ACO : Ant Colony Optimization
AGPS : Assisted Global Positioning System
AODV : Ad hoc On-Demand Distance Vector
C3 : système de Commandement, de Contrôle et de Communication
DCR : Data Centric Routing
DSDV : Destination-Sequenced Distance Vector
DSR : Dynamic Source Routing
FAA : Federal Aviation Administration
FANET : Flying Ad Hoc Network
GCS : Ground Control Station
GPMOR : Geographic Position Mobility Oriented Routing
GPRS : General Packet Radio Service
GPS : Global Positioning System
GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing
GS : Ground Station
GSM : Global System for Mobile Communications
GWO : Grey Wolf Optimization
HALE : Haute Altitude Longue Endurance
HTOL : Horizontal Take-Off and Landing
LCADR : Load Carry and Deliver Routing
LTE : Long Term Evolution
MALE : Moyenne Altitude Longue Endurance
MANET : Mobile Ad-hoc Network
MDP : Markov Decision Process
MLHR : Multilevel Hierarchical Routing
MPCA : Multilinear Principal Component Analysis
OLSR : Optimized Link State Routing
PDM : Processus de Décision De Markov
PPRZM : Papparazzi Mobility Model
PSO : Particle Swarm Optimization
RD : Route Distinguisher
RPAS : Remotely Piloted Aircraft System

Liste des Abréviations

TORA : Temporarily Ordered Routing Algorithm

U2I: UAV-to-Infrastructure

U2U : UAV-to-UAV

UAANET : UAV Ad hoc Network

UAS : Unmanned Aircraft System

UAV : Unmanned Aerial Vehicle

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

VANET : Vehicular Ad-Hoc Network

VTOL : Vertical Take-Off and Landing

ZRP : Zone Routing Protocol



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Les drones (UAV) sont l'une des outils modernes qui sont de plus en plus utilisées ces dernières années dans divers domaines.

Notre pays ayant une tendance vers ces technologies modernes qui appartiennent au domaine de l'intelligence artificielle, il est devenu nécessaire pour nous comme des étudiants universitaires de suivre cette tendance et pour satisfaire notre envie d'explorer le monde des drones, nous avons choisi ce thème de recherche.

Les UAV sont confrontés à plusieurs défis lors de l'exécution d'une mission particulière, notamment le choix de trajectoire idéal qui réduit temps d'aller pour effectuer une tâche et économise l'énergie de la batterie, ainsi que le défi d'éviter les endroits qui constituent une menace pour sa sécurité.

Pour l'aider dans ce défi, nous avons préparé un plan de recherche composé de trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons discuté des concepts généraux liés aux UAV, leur classifications, domaines d'application, ses utilisation dans un réseau FANET et on a cité quelque exemples de modèles de mobilité et projets multi-UAV dans les réseaux FANET.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mentionné trois approches pour la planification et d'allocation des tâches coopératives pour un réseau multi-UAV autonomes et hétérogènes et on a présenté l'énoncé du problème et leurs solutions algorithmiques pour l'approche de programmation en nombres entiers, de la théorie des jeux et on a concentré sur celle basée sur les processus décisionnels de chaine de Markov.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la définition de simulation en générale et nous avons évoqué quelques simulateurs réseaux, et en suivant les instructions de l'algorithme MDP d'itération de valeur - le moins complexe- pour réaliser et simuler notre projet en utilisant le simulateur Omnet++.

Enfin, il faut noter que nous avons été confrontés à plusieurs difficultés, notamment le fait que le sujet de la recherche est totalement nouvel pour nous et on n'a pas de formation préalable sur celui-ci, ainsi que la présence de la plupart des références en anglais, ce qui nous a obligé à les traduire et par conséquent il a fallu plus de temps pour terminer notre projet.

A horizontal red scroll graphic with a dark red border and rounded corners. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curling inward. The text is centered within the unrolled portion.

Chapitre I : UAV et FANET

1. Introduction

Un véhicule aérien sans pilote (UAV) - également appelé drone - est un aéronef sans pilote guidé de manière autonome avec un ordinateur de bord ou par un système de télécommande depuis un sol. Même avec l'émergence de ce type d'avion il y a longtemps, en particulier dans le domaine militaire, les drones vraiment modernes ont fait leurs débuts en tant que système d'armes important au début des années 1980, lorsqu'ils ont équipé de petits drones ressemblant à de grands modèles d'avions avec une télévision entraînable et infrarouge. Caméras et avec des désignateurs de cibles pour les munitions à guidage laser, le tout relié à une station de contrôle. Progressivement et avec les progrès de la technologie, les drones ont commencé à être utilisés dans les domaines civils et commerciaux, tels que les opérations de recherche et de sauvetage, la surveillance des catastrophes, la télédétection agricole et forestière, la couverture des réseaux, la détection et le suivi des cibles, l'estimation météorologique et le contrôle des ouragans, Surveillance de la pollution, Transport et livraison de marchandises, etc.

La technologie des véhicules aériens sans pilote a fait de grands progrès dans le passé et est largement utilisée dans de nombreux domaines. Cependant, ils sont incapables de répondre à des missions de grande envergure et complexes avec une réserve d'énergie limitée. Seuls plusieurs véhicules aériens sans pilote (multi-UAV) travaillent ensemble pour mieux faire face à ce problème et ont été largement étudiés. Le système multi-UAV utilisé dans la communication sans fil apporte de nombreux avantages, par exemple un débit plus élevé, une meilleure qualité de service, un délai plus faible, etc.

Peut-être que le problème le plus important du système multi-UAV est le problème de communication entre plusieurs UAV, de nombreuses conceptions d'architecture de réseau basées sur la forme de communication sont proposées pour résoudre ce problème. La forme de base est que tous les drones sont directement attachés à une seule station au sol ou que nous pouvons utiliser plus d'une station au sol pour les systèmes multi-UAV, même si l'architecture de plusieurs stations au sol ne conviendra pas à de nombreux types de scénarios d'application tels que l'armée et les catastrophes application. Cependant, dans cette architecture, la zone d'opération est limitée à la portée de communication entre les drones et la station au sol. Afin de résoudre la restriction de portée problème, une autre architecture de communication est que les

UAV peuvent être connecté à un satellite au lieu d'une station au sol. La troisième architecture de communication est l'utilisation du réseau cellulaire pour connecter la station au sol avec l'escadron de drones, cependant, la zone d'exploitation des drones est limitée par l'extension du réseau cellulaire. En cas d'événement catastrophique, le système UAV ne peut être déployé que si le réseau cellulaire est présent et fonctionne dans la zone. L'autre forme est l'architecture de communication Flying Adhoc Networks, selon cette architecture, alors que certains drones communiquent avec la station au sol directement, via satellite ou via un réseau cellulaire, d'autres drones sans communication directe avec la station au sol peuvent utiliser leur communication via la structure FANET. L'avantage le plus important des réseaux ad hoc pilotés est leur capacité à fournir une communication en temps réel sans avoir besoin d'aucune infrastructure. En général, ces réseaux ne reposent sur aucun support externe, ils peuvent donc être rapidement déployés n'importe où. Ces caractéristiques, d'une part, font des FANET la solution la plus appropriée pour de nombreuses applications, mais d'autre part, elles soulèvent un problème de mise en réseau difficile.

2. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

2.1. Définition

Un drone ou Unmanned Aerial Vehicle (UAV) est un aéronef sans passager ni pilote qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol. Le mot « drone » est une extrapolation d'un terme anglais qui signifie « faux-bourdon ». En français, le terme est employé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins, alors que la classification anglo-saxonne distingue chaque type d'appareil. [1]

Dans la littérature, deux termes sont habituellement employés : UAV et Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). A la différence de l'UAV, le RPAS requiert la présence d'un télé-pilote actif au sol mais pas obligatoirement d'un autopilote à bord. Le terme UAV, quant à lui, désigne un drone possédant à bord un autopilote actif qui le pilote. [2]

2.2. Classification

Les UAV et drones peuvent être classés selon plusieurs critères :

2.2.1. Selon le type de voilure

a. Drone à voilures fixes

Ce sont des drones utilisant des ailes fixes dans leur mode de déplacement, ils peuvent être : plus lourds que l'air : type avion, plus léger que l'air : type dirigeable qui utilise de l'hélium pour générer une poussée verticale et des rotors pour générer des couples. [3]



(a)



(b)

Figure 1 : Exemple de drone à voilures fixes.

b. Drones à voilures battantes

Les ailes battantes constituent un système de propulsion alternatif pour les mini et micro-aéronefs, les battements d'ailes reproduisent le vol des oiseaux ou des insectes de plus en plus fidèlement. [3] exemple libellule artificielle.



Figure 2 : La libellule artificielle.

c. Drones à voilures tournantes

Sont des appareils volants ayant la capacité de décoller, voler et atterrir verticalement (ADAV, en anglais Vertical Take-off and Landing Aircraft ou VTOL) et donc n'ont pas besoin de piste de décollage d'atterrissage. Ils utilisent des voilures tournantes ou rotors multiples pour voler en état stationnaire au-dessus d'une zone précise ou encore des vols à basse vitesse et à basse altitude. Ils peuvent réaliser une très grande variété de missions. [3]

Cette catégorie se divise de plusieurs configurations selon le nombre de rotor:

- Configuration ayant un seul rotor : figure (3.a)
- Configuration ayant deux rotors : figure (3.b)
- Configuration ayant trois rotors : figure (3.c)
- Configuration ayant quatre rotors : figure (3.d)

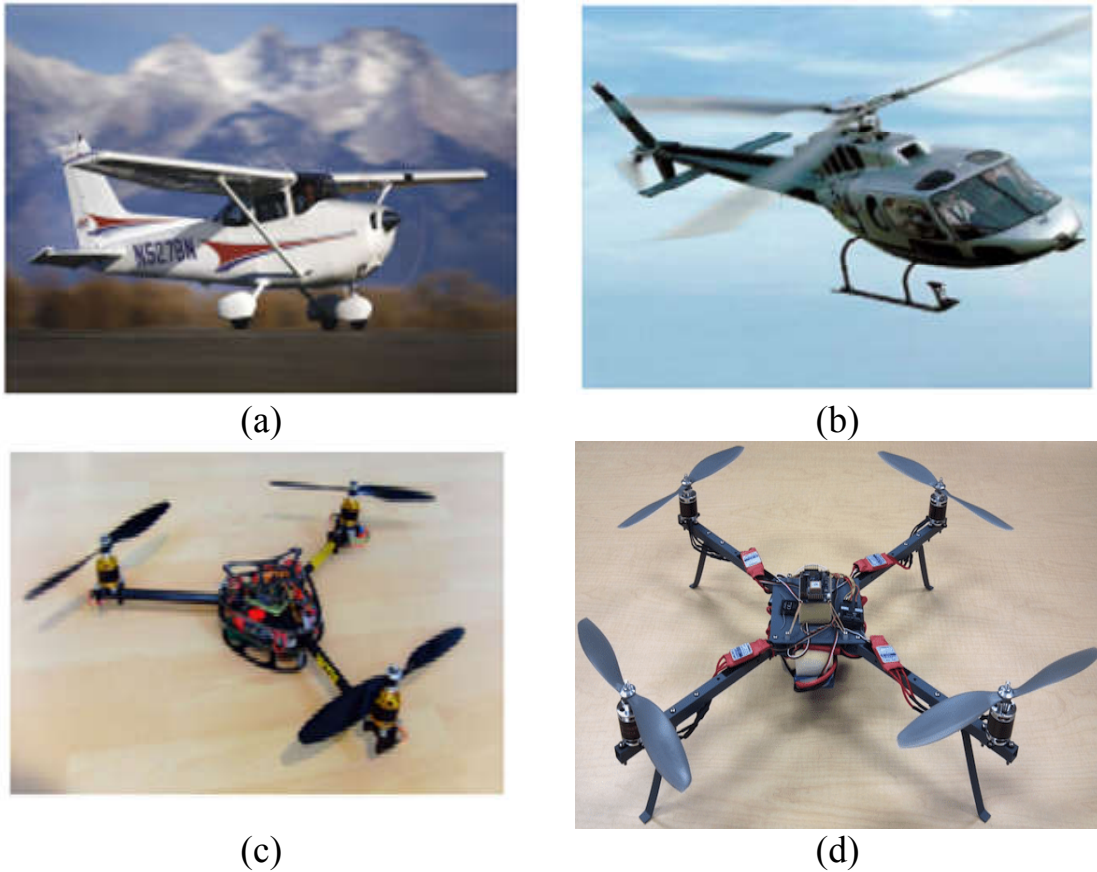


Figure 3 : Drones à voilures tournantes.

2.2.2. Selon l'altitude et l'endurance

a. HALE (Haute Altitude Longue Endurance)

Dans cette catégorie, nous atteignons les dimensions d'un avion civil (AirbusA320) pour l'autonomie de plusieurs milliers de kilomètres (10 000 km et plus) voyageant, volant nettement au-dessus du trafic aérien actuel, civil et militaire(jusqu'à 20 000 m d'altitude) , Le poids au décollage des drones HALE peut dépasser considérablement 10 tonnes, dont environ 10% pour la charge utile. [4]

b. MALE (Moyenne Altitude Longue Endurance)

L'altitude de vol dans cette catégorie est de 5000 à 12000 mètres, ce qui permet de parcourir jusqu'à 1000 km à des vitesses relativement faibles de 220 à 360 km/h (induites par des moteurs à pistons ou turbopropulseurs). elle peut atteindre 3,5 tonnes et la portée est généralement de 10 à 20 mètres. Si les Américains n'étaient pas très présents dans le domaine des drones moyens tactiques, ils ont immédiatement

conçu des systèmes MALE à la taille de la zone opérationnelle. Les drones MALE opérationnels les plus célèbres sont le *Hunter*. [4]

2.2.3. En fonction de la masse et taille

a. Mini-drones

Ce sont des drones plutôt légers de taille réduite (d'une masse de quelques kilogrammes et d'une envergure 1 à 2 mètres) facilitant la mise en œuvre d'une autonomie de 10 à 30 minutes et est généralement servent pour la surveillance des zones difficiles d'accès. Tels que Hovereeye (Bertin Technologies) ou Dragon Eye (AeroVironment) dont la dimension maximale ne dépasse pas un mètre. [5]

b. Micro-drones

Ce sont des drones de tailles allant du centimètre à plusieurs dizaines centimètres. Généralement alimentés, ils vous permettent donc de voler à l'intérieur. Comme le PicoFlyer (Proxyflyer) dont la dimension maximale ne dépasse pas 15 cm. [5]

2.2.4. La façon de décollage

a. UAV HTOL

Après de nombreuses années de développement dans les drones HTOL, il existe quatre configurations pour ces UAV, qui sont spécifiées par la portance / l'équilibre de masse et par la stabilité et le contrôle. Il s'agit de l'empennage arrière, de l'empennage avant, de la queue arrière sur les flèches et des drones sans ailes ou volant. [6]

b. UAV VTOL

Les drones VTOL à voilure fixe utilisent souvent un système de propulsion verticale à l'avant de leur fuselage et ont des ailes croisées. Ce type de drones peut décoller et atterrir verticalement et n'a pas besoin de piste pour décoller. [6]

2.2.5. drone hybride

Des efforts sont faits pour concevoir et fabriquer des drones aux capacités différentes pouvant être appliquées dans des environnements variés. Différents drones

ont été inventés ayant la capacité de marcher et de se déplacer sur le sol et dans l'eau ou de nager et de plonger sous l'eau. [3]

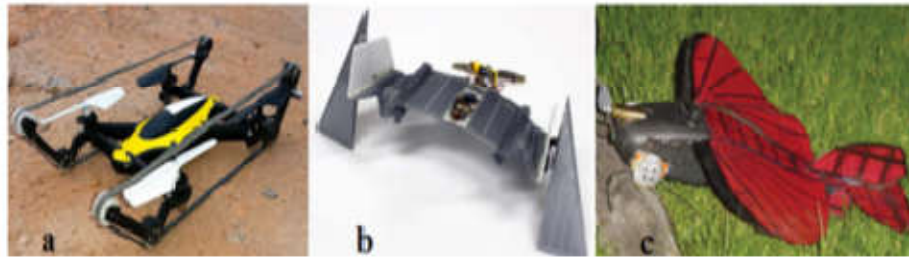


Figure 4 : Des drones hybrides air-sol : (a) quadruple chasseur de char, (b) robot DALER, et (c) MALV.



Figure 5: Drones hybrides air-eau : (a) Hydroptère perroquet, (b) Drone de l'université Rutgers, (c) HexH20, et (d) AquaMAV.

2.3. Domaines d'application

a. Militaires

La guerre du Kosovo qui s'est déroulée en 1994 a vu l'apparition des premiers drones high-tech de combat qui ont été déployés par les américains : le premier drone de combat avancé au monde est ainsi leur *MQ-1 Predator*. Depuis cette date, le monde militaire a connu une croissance fulgurante dans ce domaine. Ainsi la plupart des armées (même celles des pays en développement), se sont dotées de ces engins sans pilote. En 20 ans, le monde a eu l'apparition d'une grande diversité d'appareils sans pilote dans le monde et une évolution exponentielle de leur capacité de combat. En effet, des drones entièrement pilotés, et passés à des drones quasi-automatiques, ne nécessitant que peu d'intervention humaine, afin de remplir leur mission. Exemple X-45 et X-47B. [7]

b. Civiles

Plusieurs applications civiles des UAVs dans différents domaines [2] notamment:

- *Domaine de l'audiovisuel* : il regroupe la plupart des professionnels de l'industrie du drone. Les utilisations sont les suivantes : la photographie aérienne, la cinématographie, la réalisation de reportages sur une zone difficile d'accès.
- *Domaine de l'industrie* : certains scénarios d'applications ont été réalisés, tels que : la télésurveillance de pipelines pétroliers ; la télésurveillance des voies ferroviaires ; la cartographie, la topographie; l'inspection détaillée (sites industriels, bâtiments, ouvrages d'art).
- *L'Agriculture* : dans le domaine de l'expérimentation agricole, les drones ont un potentiel de développement important, car ils permettent de récupérer de manière économique des données essentielles à l'échelle des micro-parcelles. En effet, cette échelle rend possible l'extraction des pixels de photo pour en permettre une analyse précise et recueillir ainsi l'information de l'image brute issue d'un appareil photo.

3. Unmanned Aircraft System (UAS)

3.1. Définition

L'Unmanned Aircraft/Aerial System est un terme avancé par l'administration fédérale de l'aviation américaine, « Federal Aviation Administration » (FAA), pour regrouper les différentes dénominations (UAS, UAV System, RPAS, RPV System), l'objectif étant de les unifier afin d'utiliser le principe de système. [2]

UAS est défini comme un système dont les composants comprennent les véhicules aériens et les équipements associés qui ne transportent pas d'opérateur humain, mais volent à la place de manière autonome ou sont pilotés à distance et tous les équipements, UAS doit être considérée dans un contexte systémique qui inclut système de commandement, de contrôle et de communication (C3), et le personnel nécessaire pour contrôler l'aéronef sans pilote. [8]

3.2. Architecture d'un UAS

L'architecture d'un UAS typique [9] est illustrée dans la figure 6.

3.2.1. Véhicule aérien sans pilote (UAV)

Le composant principal d'un UAS est le drone qui peut être commandé à distance ou voler de manière autonome en fonction d'un plan de vol préprogrammé ou prédéterminé. Il est généralement nécessaire de voler hors de vue de l'opérateur et est capable de communiquer en temps réel avec le contrôleur renvoyant les données utiles. Il doit également renvoyer périodiquement des informations sur ses conditions de vol (par exemple, position, vitesse, cap ou altitude). Ces données aident l'opérateur à évaluer les conditions de vol et en conséquence, si nécessaire, lui permettent de modifier les paramètres de vol. En outre, certains UAV peuvent également être équipés de capacités de prise de décision embarquées pour prendre en charge des réponses correctives automatiques en cas de défaillance de composants. [9]

3.2.2. Charge utile (Payload)

La charge utile d'un drone est l'ensemble des systèmes embarqués qui lui permettent de réaliser sa mission, par exemple, un appareil photo, une caméra vidéo, une caméra multi spectrale, une caméra thermique, des sondes ou tout autre type de capteurs (mesurant, entre autres, des paramètres dans l'air, tels que la température, la pression ou encore le niveau de pollution). Grâce à sa charge utile, un système de drones peut être utilisé pour inspecter une zone donnée, la cartographie d'une zone déterminée, des relevés thermiques sur des bâtiments d'usine, etc. [2]

3.2.3. Station sol (GCS)

La station sol est un ensemble d'entités physiques et de logiciel qui permettent de contrôler le mouvement des drones. Selon le type de station utilisé, elle peut être munie d'une interface homme-machine qui permet à l'opérateur au sol de surveiller en temps réel la position d'un drone à l'aide d'une carte topographique sur laquelle l'itinéraire du drone est superposé. Il peut également configurer l'altitude et les paramètres de la charge utile. Grâce à une liaison en temps réel entre la station sol et le drone, le logiciel de supervision (appelé souvent logiciel Ground Control Station (GCS)) permet de visualiser la vidéo capturée par le drone ou encore les photos prises. Toutes les données traitées par ce logiciel sont géo-référencées et peuvent être ainsi enregistrées ou partagées avec d'autres systèmes d'informations géographiques. La station sol dispose également d'équipements de télécommunication en radiofréquence, qui représentent la

partie physique caractérisée par l'émetteur, et le récepteur et leurs antennes associées[2]. Le GCS communique avec les drones via la liaison montante du système de communication et attend des informations en retour sur la liaison descendante. [9]

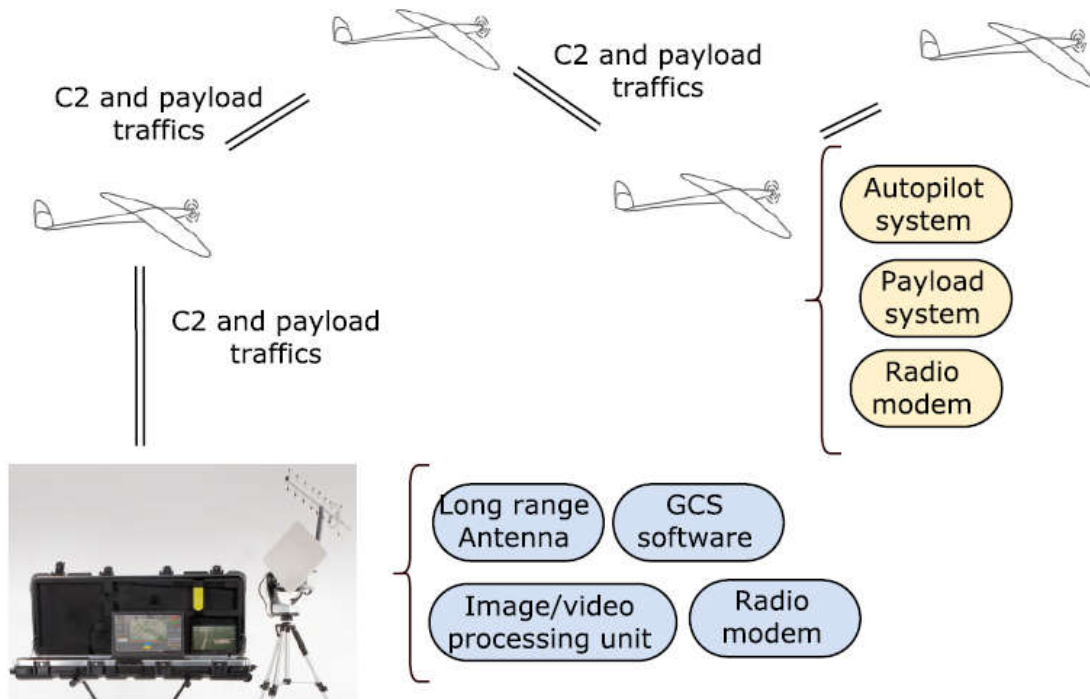


Figure 6 : Exemple d'architecture d'un UAS.

4. Multi UAV et flotte de drones

4.1. Avantages

Pour une mission de plusieurs heures et qui nécessite de parcourir une zone large, l'utilisation d'un seul drone peut être limitée en matière d'autonomie de batterie et de portée (notamment en cas de présence d'obstacles). La collaboration de plusieurs drones est une solution qui offre plusieurs avantages [2]:

- *Coût* : le coût d'acquisition et de maintenance des mini-drones mis en jeu dans une flotte de drones peut être moindre que l'utilisation d'un seul drone de grande taille.
- *Mise à l'échelle* : l'usage d'un seul drone ne permet de couvrir qu'une zone limitée. En effet, l'étendue de la mission dépend de la batterie et de la présence d'obstacles (par exemple, une montagne). Avec une flotte de drones, il est possible de créer un relais de drones pour contourner les éventuels obstacles et agrandir la zone de couverture de

l'opération. Cette fonction sera développée dans ce chapitre, avec le concept du réseau ad hoc de drones, à l'origine d'un réseau de communication autonome.

- *Survie de la mission* : la mission peut être interrompue en cas de panne d'un élément physique ou logiciel du système UAS. Toutefois, avec une flotte de drones, l'opération peut se poursuivre en cas de panne d'un des drones ou en cas d'épuisement de la batterie en reconfigurant les ressources de la flotte.

4.2. Architecture de communication Multi-UAV

Les UAVs peuvent communiquer entre eux de différentes architectures [2]:

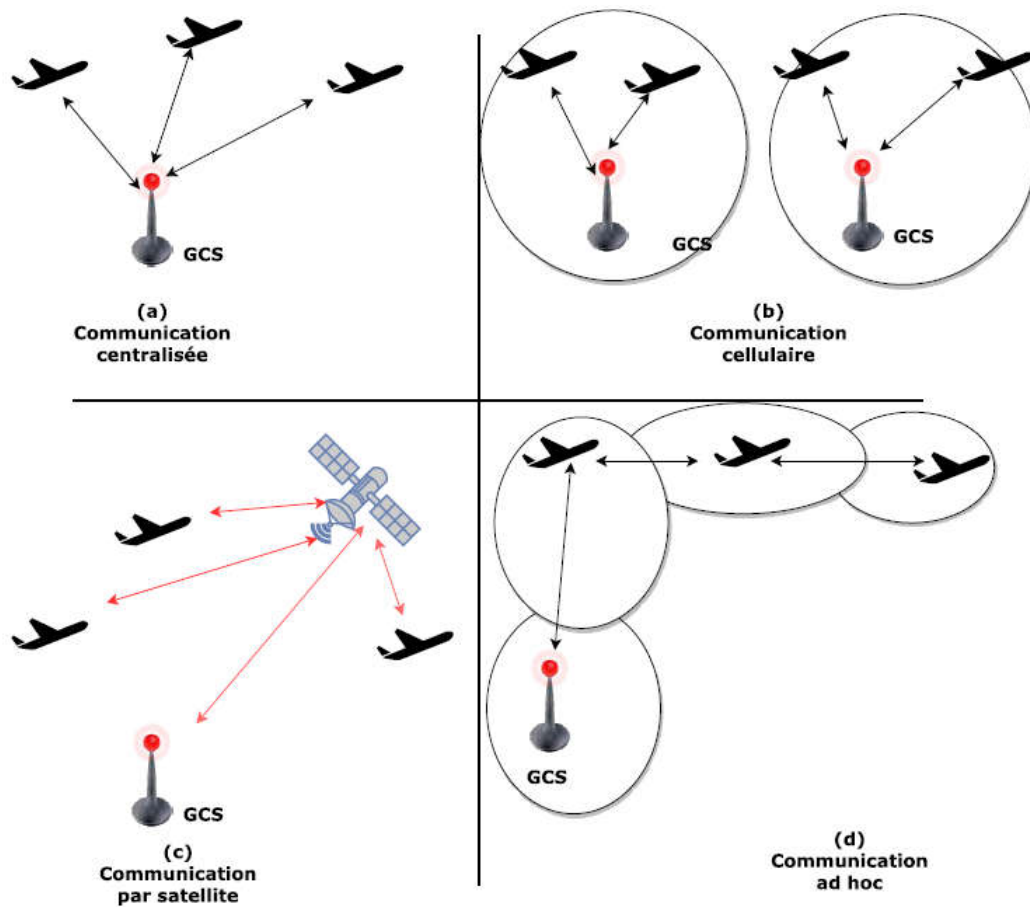


Figure 7 : Architecture de communication Multi-UAV.

4.2.1. Communication centralisée

Comme montre la figure (7.a), dans cette architecture [2] la communication est effectuée directement entre la station au sol (GCS) et chaque UAV. Le GCS est considérée comme étant un nœud central et communique avec tous les drones

simultanément, donc toute la connectivité du réseau UAV dépend de celui-ci, C'est ce qui cause des problèmes s'il plante.

4.2.2. Réseau de communication cellulaire

Il se base sur une topologie centralisée et consiste à diviser un territoire en plusieurs zones. Chaque zone est gérée par une station de base dont la tâche principale est de gérer la communication d'un groupe de nœuds. Cette structure de communication est la base des technologies de la téléphonie mobile, comme le GSM, GPRS, UMTS, LTE et des communications de données sans fil, comme le Wi-Fi et le Wimax [2]. La figure (7.b) illustre cette architecture.

4.2.3. Communication par satellite

Il est également possible de recourir à une communication par satellite pour faire communiquer deux nœuds géographiquement éloignés. Deux types de satellites :le satellite géostationnaire et le satellite orbital. Le satellite géostationnaire reste fixe par rapport à une référence géographique, en tournant autour de la terre à la même vitesse, tandis qu'un satellite orbital couvre une zone géographique variable. Ce type de communication peut être utilisé pour un dialogue entre une station sol et un drone [2]. La figure (7.c) montre cette architecture.

4.2.4. FANET (Flying Ad-Hoc Networks).

Dans le cas d'une flotte de drones, ce réseau s'intitule « réseau ad hoc de drones » (UAANET pour UAV Ad hoc NETwork). Un réseau ad hoc mobile est un réseau sans fil et sans entité centrale (contrairement à un réseau de communication centralisé ou cellulaire). Il se base sur la capacité des nœuds à coopérer pour former un réseau entre eux. Chaque nœud relaye ainsi le message de l'émetteur jusqu'à la destination. Cette coordination permet aux nœuds de se déplacer librement, ce qui peut causer des changements fréquents de la topologie du réseau [2]. La figure (7.d) illustre cette architecture.

5. Flying Ad-Hoc Networks (FANET)

5.1. Définition

Le réseau ad hoc de drones, connu sous la dénomination anglaise UAV ad hoc NETWORK (UAANET) ou encore Flying Ad hoc NETWORK (FANET), est une sous-catégorie du réseau mobile MANET. Il s'agit du déploiement d'une flotte de drones et de stations sol à travers un réseau ad hoc sans fil. Les drones collaborent entre eux et avec la(les) station(s) sol pour échanger des données qui peuvent être des données propres au routage (des paquets de contrôle) ou des informations propres au système aérien sans pilote. [2]

5.2. Caractéristiques

Comme mentionnés dans le tableau ci-dessous [10] et [11], le réseau FANET se distingue de MANET et VANET par plusieurs caractéristiques, dont certaines sont expliquées dans les lignes suivantes [10] :

La densité des nœuds dans FANET est généralement faible en raison de la grande distance séparant les nœuds qui peuvent atteindre des kilomètres. En raison de la faible densité et la très grande mobilité des nœuds.

FANET peut être considéré de connectivité faible. Cela entraîne une fluctuation de la qualité de la liaison qui peut entraîner une perte de connectivité et une dégradation des performances.

L'autonomie énergétique est élevée de fait que la puissance et les mouvements des nœuds FANET sont alimentés et fournis en utilisant les ressources énergétiques des nœuds. En effet, il n'y a pas de restriction d'énergie puisque chaque nœud est équipé de batteries rechargeables, qui se rechargent en permanence au fur et à mesure que les drones se déplacent.

Certaines applications de FANET ont besoin de services en temps réel efficace par exemple la surveillance en vidéo, ces exigences de qualité de service sont cruciales, en particulier lorsque des décisions importantes doivent être prises par l'entité recevant la vidéo.

Les mouvements des nœuds dans FANET sont généralement définis au préalable, mais peuvent être mis à jour en raison de facteurs externes (par exemple, la météo, la mission, etc.), ce qui peut affecter directement le modèle de mobilité des nœuds.

Tableau 1 : Différence entre MANET, VANET et FANET.

Caractéristiques	MANET	VANET	FANET
Densité	Haute	Haute	Faible
Connectivité réseau	Haute	Moyen	Faible
Autonomie énergétique	Faible	Haute	Élevé (dépend du type d'UAV)
Variation de topologie	Parfois	Souvent	Très souvent
Évolutivité	Moyen	Haute	Faible
Exigences de QoS	Faible	Élevé (dépend de l'application)	Élevé (dépend de l'application)
Modèles de mobilité	Aléatoire	Limité à travers le modèle de routes	Prédéfini par les modèles de mobilité
Vitesse du nœud	Moyen	Haute	Très haut
Mobilité [11]	Faible	Haute	Très haut
Localisation [11]	GPS	GPS, AGPS	GPS, AGPS

5.3. Architectures de communication

Dans FANET, les UAV maintiennent deux fonctions de base pour effectuer diverses tâches, à savoir le relais des communications UAV-UAV (U2U) et la collecte d'informations sur le réseau. En outre, les drones effectuent également deux tâches supplémentaires: Ils fonctionnent comme des unités d'accès à distance pour étendre la couverture des infrastructures, et ils peuvent développer un réseau dynamique avec des ressources hétérogènes. Selon les rôles joués par les UAV dans une architecture FANET, deux modes de mise en réseau doivent être activés: UAV-to-UAV (U2U) et UAV-to-Infrastructure (U2I). À cette fin, l'un des UAV est appelé «UAV de base», car il joue le rôle de passerelle dans l'architecture FANET. L'UAV de base collecte les données des UAV membres (via U2U), puis transmet les données agrégées à la station au sol (GS) en utilisant la communication U2I. [12]

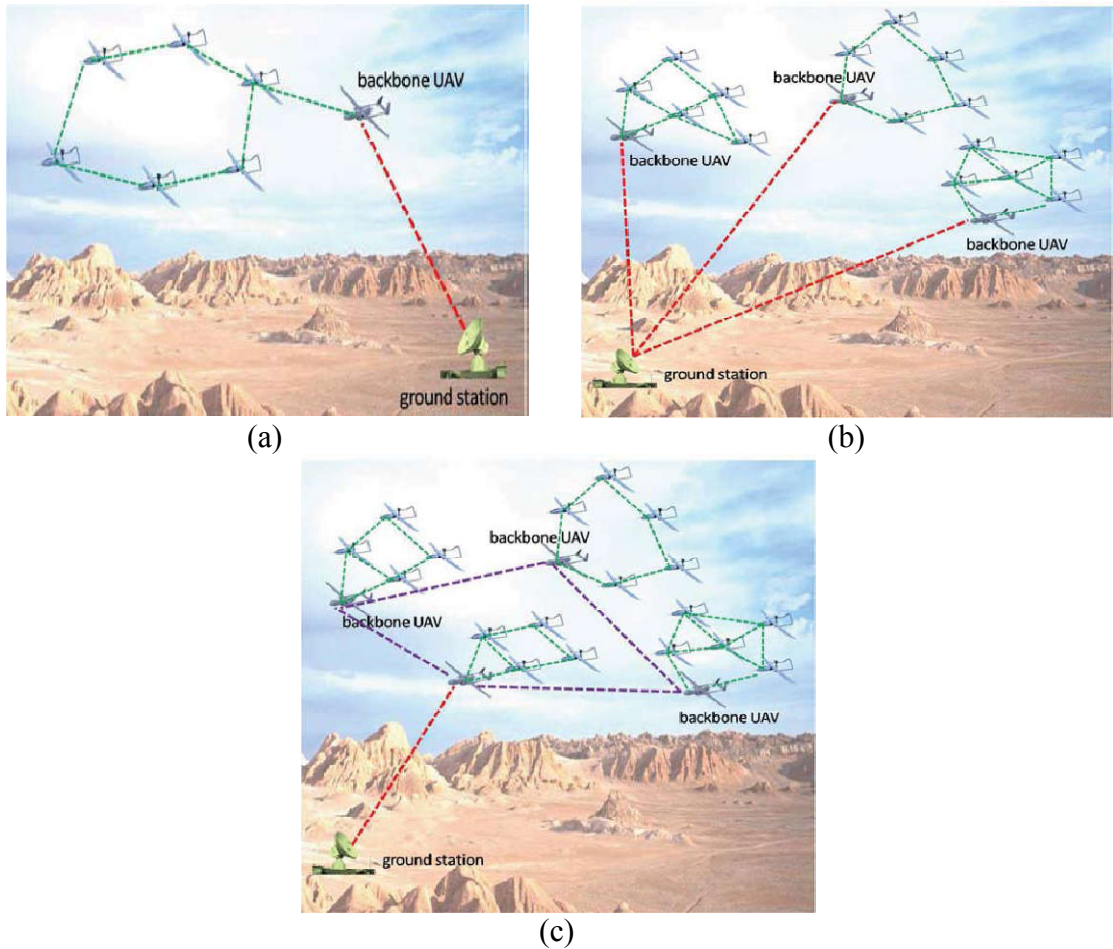


Figure 8 : Architectures de communication FANET.

5.3.1. Réseau ad-hoc d'UAV

Comme le montre la figure (8.a), dans cette architecture [12] chaque UAV contribue au processus de transmission de données pour tous les autres UAV du réseau. Le drone de base (backbone) est normalement équipé de deux radios: faible puissance courte portée utilisée pour la communication entre les drones et haute puissance longue portée pour communiquer avec le GS. Cette architecture [13] est appropriée pour un groupe d'UAV similaires et pour des opérations telles que la surveillance persistante.

5.3.2. Réseau ad-hoc d'UAV multi-groupes

Comme le montre la figure (8.b), dans cette architecture [12] les drones au sein d'un groupe forment un réseau ad-hoc, et le drone de base de chaque groupe est en outre connecté au GS de manière centralisée. La communication intra-groupe est effectuée au sein d'un réseau ad-hoc d'UAV sans impliquer le GS, tandis que la communication

inter-groupes est effectuée via le drone de base. Cette architecture est la mieux adaptée aux missions où un grand nombre de drones hétérogènes doivent être déployé et aussi est approprié [13] pour un grand nombre d'UAV avec des caractéristiques de vol ou de communication différentes.

5.3.3. Réseau ad-hoc d'UAV multicouche

Comme illustré à la figure (8.c), dans cette architecture [12] la mise en réseau entre les UAV membres au sein d'un groupe forme un réseau UAV ad hoc, qui correspond à la couche inférieure du réseau. Les drones de base de tous les groupes sont connectés les uns aux autres et viennent sous la couche supérieure. Cependant, un seul drone de dorsale d'un groupe est en outre connecté au GS. De plus, seul le GS détient les informations qui lui sont acheminées afin de réduire la communication et la charge de calcul sur le GS. Par conséquent, cette architecture convient aux missions qui impliquent un grand nombre de drones hétérogènes.

5.4. Technologie de communication

Le tableau [12] ci-dessous montre les technologies de communication probables être sélectionnés pour les différents liens (U2U et U2I) et leurs principales caractéristiques telles que la mobilité, les débits de données, la portée de communication, la latence et la topologie. Le choix de la technologie appropriée dépend de la nature de l'application et du type de mission. Les technologies sans fil peuvent être divisées en deux catégories principales:

- **Courte portée** : sont utilisés pour les communications à courte distance, telles que ZigBee , Bluetooth 5 et Wi-Fi.
- **Longue portée** : peuvent être utilisées pour les plus grandes zones, telles que le LTE, 5G, WiMAX et le satellite.

Tableau 2 : Comparaison entre les technologies de communication FANET.

Technologie de communication	Norme IEEE	Fréquence / moyenne	Type de spectre	Mobilité	Débit de données théorique	Gamme Intérieur-Extérieur	Typologie du réseau	Latence	Avantages	Limites
Wi-Fi	802.11	2.4 GHz IR	Sans licence	Oui	jusqu'à 2 Mbps	20m-100m	Ad-hoc, star, Mesh,hybrid	< 5 ms	Haute vitesse et peu coûteux	Gamme limitée
	802.11a	5 GHz	Sans licence	Oui	jusqu'à 54 Mbps	35m-120m				
	802.11b	2.4 GHz	Sans licence	Oui	jusqu'à 11 Mbps	35m-140m				
	802.11n	2.4/5 GHz	Sans licence	Oui	jusqu'à 600 Mbps	70m-250m				
	802.11g	2.4 GHz	Sans licence	Oui	jusqu'à 54 Mbps	38m-140m				
	802.11ac	5 GHz	Sans licence	Oui	jusqu'à 3466 Mbps	35m-120m				
Bluetooth 5	802.15.1	2.4 GHz	Sans licence	Oui	jusqu'à 2 Mbps	40m-200m	Ad-hoc, Piconet	3 ms	Consommation faible d'énergie	Faible débit de données
ZigBee	802.15.1	2.4 GHz	Sans licence	Oui	250 Kbbps	10m-100	Ad-hoc, star, Mesh,tree, Cluster	15 ms	Faible Coût	Faible débit de données
WiMAX	802.16	2 à 11 GHz	Avec licence	Oui	jusqu'à 75 Mbps	jusqu'à 48 km	Wide-area Wireless backhaul	30 ms	Haute débit	Problèmes d'interférence
LTE	802.16a	jusqu'à 20 MHz	Avec licence	Oui	jusqu'à 300 Mbps	jusqu'à 100 km	Flat, IP based	5 ms	Bande passante élevée	Coûteuse
5G	5G (eMBB)	28 GHz	Avec licence	Oui	jusqu'à 20 Gbps	large zone	IP based	1 ms	Débit de données élevé	Coûteuse
Satellite	Satellite	jusqu'à 40 GHz	Avec licence	Oui	jusqu'à 1 Mbps	à l'échelle mondiale	-	550 ms	Large couverture	Retard élevé et coût élevé

5.5. Routage et protocoles de routage

Le routage est une méthode contribuant à l’acheminement des données depuis un nœud émetteur jusqu’à son (ses) destinataire(s). Dans les réseaux ad hoc mobiles, le routage se base sur une approche de réémission des paquets. Le problème réside donc dans le choix du chemin optimal. En effet, le routage revient à calculer le meilleur chemin reliant deux nœuds quelconques dans le réseau. Il s’agit alors d’affecter une certaine métrique aux liens, afin que la recherche de route revienne, par exemple, à calculer le plus court chemin entre la source et la destination. [2]

Les protocoles de routage traditionnellement déployés dans les réseaux filaires s’avèrent inadaptés aux contraintes des réseaux ad hoc [14]. Et cela dans les réseaux FANET [2] grâce à la grande mobilité de ses nœuds impliquent les changements fréquents de la topologie existantes.

Dans la littérature, nombreux protocoles de routage pour les réseaux FANET ont été proposés et classés suivant diverses métriques de conception (leur méthode de création et de maintenance des routes, ou leur méthode d’acheminement des données....). [2]

La figure ci-après illustre ces protocoles classés en 05 catégories principales (basé sur *la topologie, la position géographique, l’intelligence en essaim, les protocoles hiérarchique et hétérogènes*).

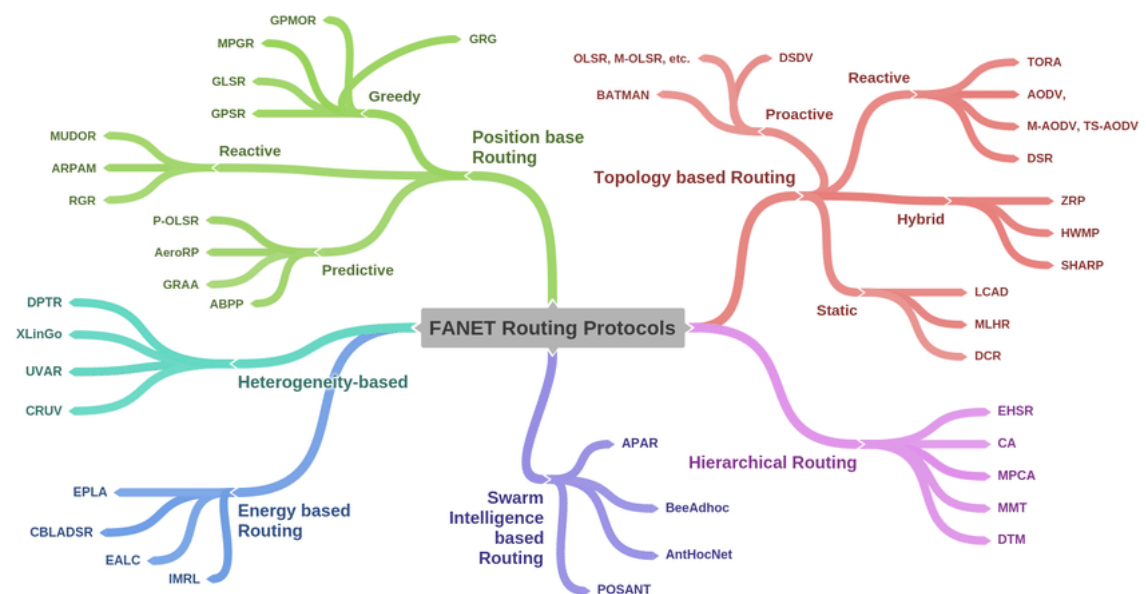


Figure 9: Taxonomie des protocoles de routage FANET. [15]

LCADR (Load Carry and Deliver Routing) [16], *MLHR* (Multilevel Hierarchical Routing) [17] et *DCR* (Data Centric Routing) [18] sont des exemples de routage *statique*, où chaque drone du réseau a une table de routage fixe qui n'est pas mise à jour pendant toute la mission. Ces protocoles de routage est souhaitable dans les cas où la topologie du réseau ne change pas, ces protocoles ne sont pas tolérants aux pannes car en cas d'échec de la mise à jour de la table de routage, il est obligatoire d'attendre la fin de la mission.

Dans les protocoles de routage *proactifs*, chaque nœud gère périodiquement une ou plusieurs tables indiquant la topologie complète du réseau. ils ont l'avantage d'avoir un parcours immédiatement accessible en cas de besoin. Cependant, la productivité du réseau peut être influencée par l'envoi inutile de messages de contrôle. *DSDV* (Destination-Sequenced Distance Vector) [19] et *OLSR* (Optimized Link State Routing) [20] sont des exemples de protocoles de routage proactifs.

Pour les protocoles de routage *réactifs* - également appelés protocole de routage à la demande - la table de routage est mise à jour lorsqu'il y a des données à envoyer, sinon il n'est pas nécessaire de calculer une route entre les nœuds. Deux types de messages sont échangés, à savoir Route Request et Route Reply. Les principaux inconvénients de ces protocoles sont un temps de latence élevé dans la recherche de route et une inondation excessive pouvant entraîner un engorgement du réseau. on peut lister, *AODV* (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [21], *DSR* (Dynamic Source Routing) [22] et Power-Aware DSR [22] comme exemples de protocoles de routage réactif.

Reprendre les meilleures fonctionnalités et dépasser les limites des protocoles réactifs et proactifs, de ce principe est née l'idée de protocoles *hybrides*. Les protocoles hybrides sont particulièrement adaptés aux grands réseaux et sont basés sur les concepts de zones, où ils utilisent le routage proactif dans la même zone et le routage réactif est utilisé entre les zones. Pour ce type de protocole de routage, on peut trouver *ZRP* (Zone Routing Protocol) et *TORA* (Temporarily Ordered Routing Algorithm) [23].

Les protocoles de routage basés sur la *position* supposent que la connaissance des informations de position *géographique* des drones permet un routage efficace. pour ce type de protocole, le nœud source connaît la position physique de celui de destination et envoie un message sans trouver de route. Le *GPSR* (Greedy Perimeter Stateless

Routing) [24] et le **GPMOR** (Geographic Position Mobility Oriented Routing) [25] sont des exemples de protocoles de routage géographique.

Les protocoles de routage **hiérarchiques** sont principalement déterminés avec des routes planifiées de manière proactive, puis facilitent l'interrogation des nœuds déclenchés via un protocole réactif à des niveaux inférieurs. Les principaux inconvénients de ce protocole sont la complexité et le schéma d'adressage de la réponse à la demande de trafic et, par conséquent, les facteurs d'interconnexion. Pour les algorithmes hiérarchiques, nous pouvons citer l'algorithme de clustering de prédiction de mobilité **MPCA** et l'algorithme de clustering de la mise en réseau d'UAV [26].

De nos jours, les algorithmes probabilistes basés sur des processus naturels sont une tendance efficace dans la modélisation évolutive. Un autre mot **bio-inspiré** est largement utilisé, mais l'auto-organisation et le bio-inspiré ont une nette différence. Des mécanismes bio-inspirés tels que **ACO** Ant Colony Optimization, **PSO** Particle Swarm Optimization et **GWO** Grey Wolf Optimization ont été proposés pour le clustering dans des réseaux ad-hoc de mouches.

5.6. Applications des FANETs

Trois types d'application des FANET sont présentés dans [10]:

5.6.1. Coopération multi-UAV

De nombreux types d'applications sont basés sur la coopération multi-UAV [10], comme la détection de cibles, la localisation géographique précise, le suivi et la surveillance en cas de catastrophe et les situations d'urgence et aussi [27] pour :

- Le transport de charges en utilisant la capacité de charge utile conjointe de plusieurs UAV pour transporter une charge plus lourde.
- Les tâches de surveillance aérienne : dans les applications liées à la sécurité et à la sûreté en particulier.
- La détection et la surveillance des incendies de forêt.

5.6.2. Tâches UAV- sol

D'après [10] Les UAVs communiquent les informations importantes, pour permettre à un homme opérateur situé sur le terrain de prendre les bonnes décisions

dans différents scénarios tels que la recherche et sauvetage missions, militaires de surveillance et d'autres applications civiles.

5.6.3. Collaborations UAV-VANET

La coopération UAV-VANET est apparus récemment [10] et peut être utilisée dans différentes applications telles que l'exploration du trafic routier, l'amélioration du routage, la livraison de paquets de données, la surveillance du trafic, le guidage d'itinéraire, etc.

5.7. Modèles de Mobilité

Le modèle de mobilité est un enjeu majeur dans la conception des protocoles de communication pour les FANET car l'évaluation des performances des protocoles est une étape critique pour anticiper les problèmes éventuels qui peuvent avoir des impacts négatifs sur les performances du réseau dans une implémentation réelle. Compte tenu des défis associés aux bancs d'essai, une évaluation des performances et une analyse des protocoles conçus nécessitent un schéma de mobilité qui peut imiter le mouvement de vrais drones dans le réseau. [27]

Le modèle de mobilité dans un réseau FANET dépend généralement de divers paramètres. Il est le plus souvent prévisible, mais, dans la majorité des cas, il est dynamiquement modifié à cause de la vitesse des drones, des conditions climatiques et de nombreux autres paramètres géographiques et topographiques. En effet, nous pouvons rencontrer quelques cas d'applications de flottes de drones avec des trajectoires prédéfinies ou préférées. Néanmoins, comme l'environnement est dynamique, le plan de vol est souvent amené à être recalculé par l'autopilote. Quelques modèles de mobilité ont été proposés dans la littérature. [2]

Les modèles de mobilité DPR, ST, SRCM et PPRZM sont les plus préférés pour les FANET en raison des caractéristiques spécifiques à l'application de ce type de réseau.[27]

Le tableau ci-après donne une comparaison entre les différents modèles de mobilité:

Tableau 3 : Comparaison entre les modèles de mobilité. [27]

Scénarios de modèle	Avantages	Les inconvénients	Application
RWP	Simple à modéliser et à mettre en œuvre, bien paramétré pour ajuster le caractère aléatoire	Ne suit pas les contraintes mécaniques et aérodynamiques (virages serrés et arrêts brusques), répartition spatiale non uniforme des drones, pas de mécanisme d'évitement de collision, peut conduire à des résultats ordinaires	Convient aux réseaux mobiles ad hoc (MANET)
RD	Simple à modéliser et à mettre en œuvre, bien paramétré pour ajuster le caractère aléatoire	Ne suit pas les contraintes mécaniques et aérodynamiques, pas de mécanisme d'évitement de collision, peut conduire à des résultats ordinaires	Convient aux réseaux mobiles ad hoc (MANET)
GM (3D)	A une accélération douce (réduit les arrêts et les démarrages soudains), peut imiter les changements de topologie fréquents du réseau	Virages serrés, pas de mécanisme d'évitement de collision.	Missions de reconnaissance, de recherche et de sauvetage
SMM	A une accélération douce	Pas d'évitement de collision, la mobilité des drones est limitée par le point de référence	Surveillance et surveillance coopératives, systèmes de détection actifs reconfigurables, transport coopératif des charges
DPR	Accélération en douceur et virages en douceur, meilleure couverture réseau et propriété de	Évitement partiel des collisions, ne tient pas compte de la connectivité réseau, mobilité limitée avec	Applications de recherche et sauvetage, couverture réseau, reconnaissance et patrouille

	numérisation	rayon de braquage fixe	
ST	Suit les contraintes aérodynamiques (virages souples flexibles et capture la corrélation spatio-temporelle de l'accélération), peut imiter les changements de topologie fréquents	Aucun mécanisme d'évitement de collision	Patrouilles, missions de reconnaissance
SRCM	Réduit les éventuelles collisions entre les drones en raison de sa nature de mouvement circulaire, trajectoire douce sur le même cercle	Le mouvement des drones est contraint avec un centre de virage fixe, le changement de rayon de virage conduit à un mouvement de drone irréaliste	Missions de recherche et de sauvetage, couverture du réseau, détection des incendies de forêt, surveillance du trafic et de la ville, recherche de cibles évitant
PPRZM	Réduit le virage serré	Aucun mécanisme d'évitement de collision	Recherche et sauvetage, détection environnementale, gestion agricole

6. Projets multi-UAV de FANET

Le tableau ci-dessous présente quelque exemple de projet FANET existants avec ces objectifs et ces caractéristiques :

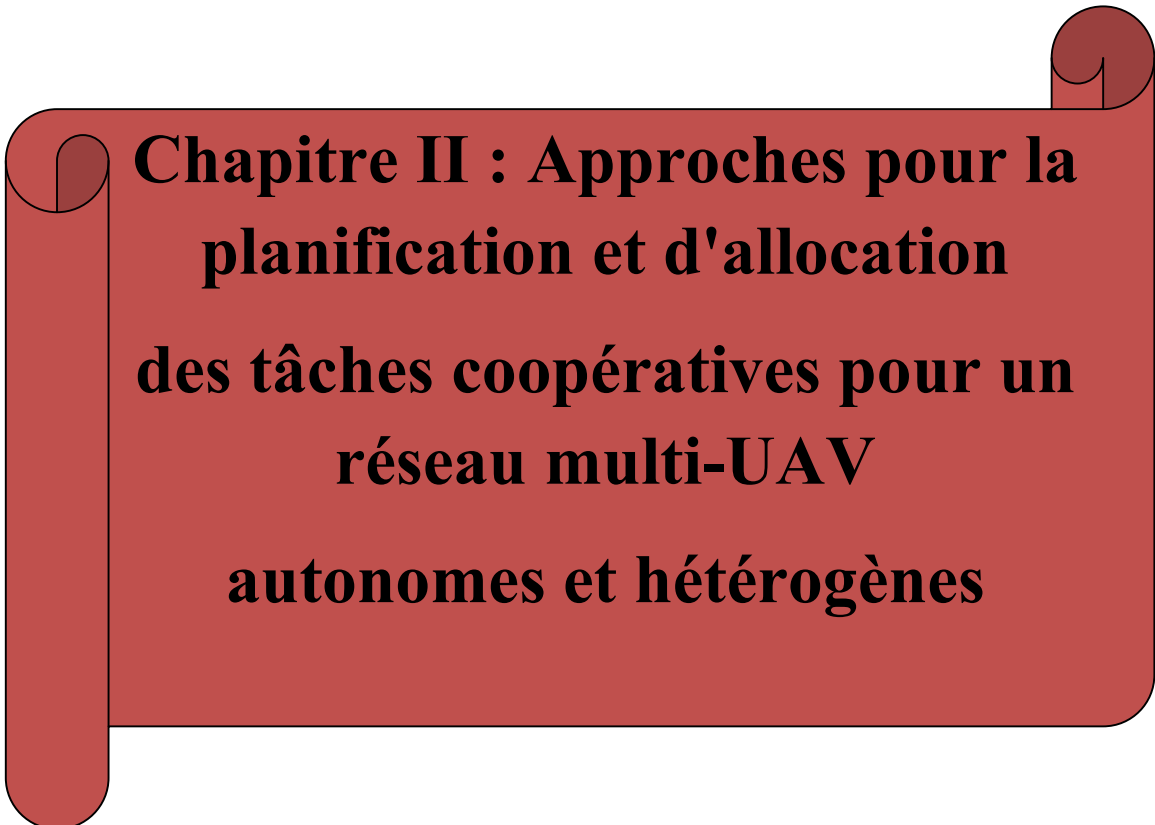
Tableau 4 : Exemple de Projets FANET existants [9]

Projet	Objectif	Caractéristiques
CARUS	Recherche de cibles	- Nœuds: essaim de 5 drones et GCS - Algorithme de visualisation au sol - Protocole de routage en retard (Delay) avec mode de communication (broadcast) asynchrone
AUGNET	Relais pour réseau terrestre	- Utilisation du protocole de routage DSR - Liaison de données : 802.11b
	Supervision en cas de catastrophe	- Amélioration de la qualité de service - Utilisation des interdépendances

Airshield		<ul style="list-style-type: none"> - Trois liaisons de données pour assurer une haute fiabilité - Une liaison inter Drone pour maintenir un réseau maillé entre les drones - Un lien UAV vers station au sol est utilisé pour partager les informations relatives aux UAV avec le GCS - Une liaison de données back-end est utilisée pour assurer une communication efficace entre les différents composants du système back-end.
SUAAVE	Mission de sauvetage	<ul style="list-style-type: none"> - Liaison de données 802.11 - Algorithme POMDP mis en œuvre pour l'échange de données entre les nœuds
SMAVNET	Surveillance de zone inaccessible	<ul style="list-style-type: none"> - Réseaux ad hoc maillés partiellement connectés entre drones - P-OLSR utilisé comme protocole de routage UAANET
SUANET	Architecture de communication ad-hoc sécurisée	<ul style="list-style-type: none"> - Définissez un mécanisme de gestion des clés au sein des UAANET pour permettre le déploiement de plusieurs clés entre les UAV. - Protocole de routage sécurisé pour les UAANET - Sécurisation des échanges de trafic de charge utile entre drones.

7. Conclusion

Le déploiement rapide d'interfaces radio Wi-Fi à faible coût, de systèmes de positionnement global (GPS), de capteurs et de micro-ordinateurs embarqués a permis aux véhicules aériens sans pilote (UAV) d'être largement utilisés pour diverses applications dans les domaines militaire et civil. Le déploiement d'un grand nombre de drones présente des défis, tels que la garantie d'un fonctionnement transparent sans collision. Pour une coopération et une collaboration appropriée entre plusieurs drones, une communication sans fil inter-UAV est nécessaire pour former un réseau de drones ou un réseau ad hoc volant (FANET). A travers ce chapitre, nous introduisons quelques détails sur le réseau Fly ad hoc FANET. FANET est un type de réseau décentralisé, qui contient des nœuds volants (UAVs), ces nœuds peuvent rejoindre ou quitter librement le réseau. Ainsi via ce chapitre, nous présentons les caractéristiques, la communication et les défis des réseaux FANET.

A decorative red scroll graphic with a dark red border and rounded corners. The scroll is unrolled in the center, revealing the chapter title. The top and bottom edges of the scroll are rolled up, and the left and right sides are also rolled up, creating a central rectangular opening.

**Chapitre II : Approches pour la
planification et d'allocation
des tâches coopératives pour un
réseau multi-UAV
autonomes et hétérogènes**

1. Introduction

L'utilisation d'agents robotiques, tels que les véhicules aériens sans pilote (UAV) ou les véhicules terrestres sans pilote (UGV), a motivé le développement de nombreuses méthodes d'allocation et de planification de tâches coopératives autonomes. Les applications de ces algorithmes de planification incluent l'utilisation d'équipes d'agents en réseau hétérogènes pour accomplir des missions autonomes. Compte tenu de la complexité des missions coopératives envisagées, de nombreuses approches de solutions ont été développées ces dernières années. Les sections suivantes décrivent brièvement trois formulations courantes du problème : la programmation en nombres entiers, les processus de décision de Markov et la théorie des jeux.

2. Approche de programmation en nombres entiers

2.1. Introduction

Un problème de programmation en nombres entiers est un programme d'optimisation mathématique ou de faisabilité dans lequel certaines ou toutes les variables sont limitées à des nombres entiers. Dans de nombreux contextes, le terme fait référence à la programmation linéaire en nombres entiers (ILP), dans laquelle la fonction objective et les contraintes (autres que les contraintes d'entiers) sont linéaires.

La programmation en nombres entiers est NP-complète. En particulier, la programmation linéaire en nombres entiers 0-1, dans laquelle les inconnues sont binaires, et seules les restrictions doivent être satisfaites, est l'un des 21 problèmes NP-complets de Richard Karp. [28]

Si certaines variables de décision ne sont pas discrètes, le problème est appelé problème de programmation en nombres entiers mixtes.

Il y a deux raisons principales d'utiliser des variables entières lors de la modélisation de problèmes en tant que programme linéaire :

- Les variables entières représentent des quantités qui ne peuvent être que des entiers. Par exemple, il n'est pas possible de construire 3,7 voitures.
- Les variables entières représentent des décisions (par exemple, s'il faut inclure une arête dans un graphique) et ne devraient donc prendre que la valeur 0 ou 1.

Ces considérations se produisent fréquemment dans la pratique et la programmation linéaire en nombres entiers peut donc être utilisée dans de nombreux domaines d'application, par exemple, et sans s'y limiter, planification de la production, ordonnancement, cloisonnement territorial, réseaux de télécommunications, guidage drone, ...etc.

2.2. Énoncé du problème

Étant donné un ensemble de N_t tâches et un ensemble de N_a agents, le but d'un algorithme d'allocation de tâches est de trouver une allocation qui maximise une fonction de récompense globale tout en appliquant toutes les contraintes spécifiques au

problème et au domaine. Ce problème généralisé d'affectation de tâches peut s'écrire sous la forme :

$$\operatorname{argmax}_{s,x,\tau} \sum_{j=1}^{N_t} R_j(s, x, \tau)$$

$R_j(s,x,\tau)$: représente le score obtenu par l'équipe pour la tâche j . Ce score est une fonction de s , représentant les trajectoires d'état pour tous les agents de x , une matrice de variables de décision ($x_{ij}=1$ si la tâche j est affectée à l'agent i et 0 sinon) ; et t_{ij} est une variable représentant le moment auquel l'agent i effectue la tâche j si $x_{ij}=1$ et n'est pas défini autrement. L'ensemble d'indices qui itère sur les agents i est défini comme $I \triangleq \{1, \dots, Na\}$, et l'ensemble d'index qui itère sur les tâches j est défini comme $J \triangleq \{1, \dots, Na\}$. $S(x,t)$ définit l'ensemble des trajectoires possibles satisfaisant à la fois les contraintes véhicule et environnementale en fonction de x et t ; X définit l'ensemble de toutes les allocations de tâches réalisables en tenant compte des contraintes de capacité des agents et des contraintes entre les tâches ; et T définit l'ensemble de tous les temps de service de tâches réalisables, en tenant compte des contraintes temporelles éventuellement compliquées entre ces tâches. En général, l'espace de contraintes complet de l'environnement d'allocation des tâches est défini par le triple de $(S \times X \times T)$. Cet espace d'état peut être utilisé pour spécifier la plupart des problèmes d'allocation de tâches et de planification de mouvement. En raison de cette généralité extrême, la cardinalité de l'espace d'état est indénombrable et est donc un espace très difficile à rechercher, même approximativement. [35]

2.3. Solutions algorithmiques

De nombreux chercheurs ont examiné de nombreux aspects du problème d'affectation des tâches pour les systèmes multi-UAV. Cela inclut les méthodes traditionnelles pour les problèmes de tournées de véhicules (VRP) par les communautés de recherche opérationnelle et d'intelligence artificielle. [29]

Des méthodes d'optimisation exactes telles que branch and bound, branch and cut, les problèmes de satisfaction de contraintes (CSP) et la programmation dynamique (DP) ont été utilisées pour résoudre le problème à l'optimalité, en utilisant des solveurs logiciels standard. [30]

Ces méthodes sont gourmandes en calculs, bien qu'elles garantissent des résultats optimaux, et cette complexité devient un problème important lorsque le problème a des contraintes secondaires délicates. Ces problèmes de complexité rendent généralement les techniques de solution optimale insolubles pour de nombreux problèmes d'intérêt et, par conséquent, de nombreuses méthodes d'approximation ont été proposées.

Des différentes méthodes heuristiques telles que la recherche tabou [31], l'entropie croisée [32], l'optimisation de l'essaim de particules [33], ont également été proposés ces dernières années pour résoudre ces problèmes d'optimisation complexes.

Enfin, des travaux récents ont envisagé d'utiliser des techniques d'apprentissage (machine Learning) pour guider le processus de solution MILP. [34]

1. Set parameters and generate m initial paths
2. Calculate the fitness value of each path
3. For $d = 1$ to D do
4. For $i = 1$ to m do
5. If $S(P_{g,d-1}, P_{i+1,d}) < S(P_{g,d-1}, P_{i,d})$
6. $P_{g,d} = P_{i+1,d}$
7. else $P_{g,d} = P_{i,d}$
8. end if
9. end for
10. $P_{g,d-1} = P_{g,d}$
11. end for
12. Calculate the fitness value of P_g
13. Select the path with the smallest fitness value as the current $gbest$
14. while $t \leq t_{max}$ do
15. for each particle (i.e. $i = 1: m$)
16. for each dimension (i.e. $d = 1: D$)
17. Update the velocity and position of the particle using Eq. (30)
18. end for
19. end for
20. Calculate the fitness values of new particles
21. Update $pbest$ and yield candidate $gbest$ route P_c
22. for $d = 1$ to D
23. for $i = 1$ to m
24. if $S(P_{g,d-1}, pbest_{i+1,d}) < S(P_{g,d-1}, pbest_{i,d})$
25. $P_{g,d} = pbest_{i+1,d}$
26. else $P_{g,d} = pbest_{i,d}$
27. end if
28. end for
29. $P_{g,d-1} = P_{g,d}$
30. end for
31. Calculate the fitness value of P_g
32. Select the path with the smallest fitness value as the $gbest$
33. $t = t + 1$;
34. end while
35. Output the best route for the UAV

Figure 10: GBPOS Algorithm (Global Best Particle Swarm Optimization) [33]

3. Approche basée sur les processus décisionnels de chaîne de Markov

3.1. Introduction

D'après [35] le processus de décision de Markov (MDP) est un cadre bien étudié pour permettre des stratégies de planification coopérative pour les équipes multi-agents et permet des solutions quasi optimales dans de nombreux domaines. Il constitue aussi une architecture formelle pour représenter les problèmes de prise de décision stochastique et séquentielle.

Les problèmes de décision séquentielle dans l'incertain couplent les deux problématiques de décision séquentielle et de décision dans l'incertain. Les problèmes décisionnels de Markov sont une formalisation mathématique, qui généralise les approches de plus court chemin dans un environnement stochastique [36]: A la base de ce formalisme, les processus décisionnels de Markov intègrent les concepts [36]:

- d'état qui résume la situation de l'agent à chaque instant.
- d'action (ou décision) qui influence la dynamique de l'état.
- de revenu (ou récompense) qui est associé à chacune des transitions d'état.
- de probabilité [37] de passer à un état après l'exécution d'une action.

Les concepts précités sont illustrés dans la figure suivante :

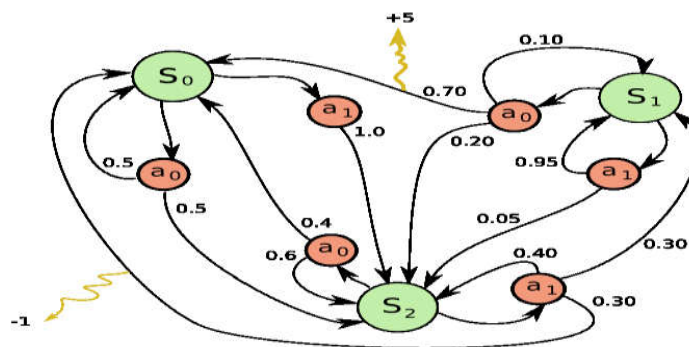


Figure 11 : Exemple de MDP [37]

Résoudre un MDP, c'est contrôler l'agent pour qu'il se comporte de manière optimale, c'est-à-dire de façon à maximiser son revenu. Toutefois, les solutions d'un MDP ne sont pas des décisions ou séquences de décisions, mais plutôt des politiques, ou stratégies, ou encore règles de décision, qui spécifient l'action à entreprendre en chacune des étapes pour toutes les situations futures possibles de l'agent. Du fait de

l'incertitude, une même politique peut donner lieu à des séquences d'états / actions très variées selon les aléas. [36]

3.2. Énoncé du problème

Dans [35] les deux énoncés mathématiques de ce problème sont mentionnés :

a. MDP à horizon fini

Un processus de décision Markovien à horizon fini peut être décrit par le tuple suivant :

$\langle S, A, P, R, T \rangle$, où les éléments sont décrits comme suit:

- S: définit l'espace d'états qui est composé d'un ensemble discret d'états $s \in S$
- A: définit l'espace d'action avec un ensemble discret d'actions $a \in A$
- P: définit une fonction de transition de la forme :

$P(s,a,s') : S \times A \times S \rightarrow [0,1]$ spécifiant la probabilité de passage à l'état $s' \in S$ à partir de l'état $s \in S$ après avoir effectué l'action $a \in A$.

- R: définit une fonction de récompense $R(s,a,s') : S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}$ spécifiant les récompenses et les coûts associés à l'application de l'action $a \in A$ dans l'état $s \in S$ et au passage à l'état $s' \in S$

- T: représente l'horizon fini discret (nombre de pas de temps)

Étant donné une politique π , une valeur $Q_k^\pi(s, a)$ peut être défini pour chaque paire état-action avec k pas de temps restants, qui représente la somme attendue des récompenses remises pour un agent suivant π pendant k étapes, en commençant à s par l'action a:

$$Q_k^\pi(s, a) = E_\pi[\sum_{t=0}^k r_t | s_0 = s, a_0 = a]. \quad (1)$$

En conséquence, la valeur de chaque état pour la politique fixe π avec k étapes restantes est :

$$V_k^\pi(s) = \max_a Q_k^\pi(s, a). \quad (2)$$

L'objectif du problème du MDP est d'obtenir une politique optimale π_k^* qui maximise la récompense cumulative attendue pour chaque état et pas de temps :

$$\pi_k^*(s) = \operatorname{argmax}_{\pi} Q_k^{\pi}(s, \pi_k(s)). \quad (3)$$

b. MDP à horizon infini

Pour certains domaines, il n'est pas possible de spécifier l'horizon de planification exact. Ces problèmes sont modélisés à l'aide de MDP d'horizons infinis représentés par le tuple $\langle S, A, P, R, \gamma \rangle$. Les définitions de tous les termes restent les mêmes que pour les MDP à horizon fini sauf γ .

γ représente le facteur de remise associé à l'obtention de récompenses dans le futur plutôt que maintenant. La fonction Q correspondant à la politique π pour les MDP à horizon infini est :

$$Q^{\pi}(s, a) = E_{\pi}[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t | s_0 = s, a_0 = a]. \quad (4)$$

Notez que l'indice k a été supprimé de la définition par rapport à équation (1), De même, la fonction V et la politique optimale π^* sont remplacées par :

$$V^{\pi}(s) = \max_a Q^{\pi}(s, a). \quad (5)$$

$$\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_{\pi} Q^{\pi}(s, \pi(s)) \quad (6)$$

3.3. Solutions algorithmiques

La résolution d'un MDP [35] consiste à trouver une politique optimale π^* telle que définie dans les équations précédentes (équation 3 et 6). Aussi le choix de la formulation du problème (à l'horizon fini ou infini) a un impact sur les algorithmes de solution potentiels qui peuvent être utilisés.

a. Dans le cas de l'horizon fini

L'approche la plus courante consiste à utiliser un algorithme en programmation dynamique, [35] en utilisant les équations suivantes avec la condition d'arrêt $V_0^*(s) = 0$.

$$Q_k^*(s, a) = \sum_{s' \in S} P(s, a, s') (R(s, a, s') + V_{k-1}^*(s')). \quad (7)$$

$$V_k^*(s) = \max_a Q_k^*(s, a). \quad (8)$$

$$\pi_k^*(s) = \operatorname{argmax}_a Q_k^*(s, a) . \quad (9)$$

Notez que la politique optimale dans le cas des MDP à horizon fini dépend du temps; ainsi, des horizons temporels différents aboutissent à des politiques différentes. Ce fait doit être pris en considération lors du choix d'un horizon temporel approprié pour la planification. [35]

La complexité temporelle et spatiale de cet algorithme est en $O(k|S|^2|A|)$. [36]

b. Dans le cas de l'horizon infini

Une formulation alternative est nécessaire car il n'y a pas d'étape finale. Dans ce cas, la politique optimale peut être trouvée en itérant sur deux étapes: la 1^{ère} est l'évaluation de politique et la 2^{ème} l'amélioration de politique. L'étape d'évaluation de politique trouve la fonction de valeur pour une politique fixe donnée. [35] donc l'équation (5) en particulier peut s'écrire :

$$V^\pi(s) = \sum_{s' \in S} P(s, \pi(s), s') \left(R(s, \pi(s), s') + \gamma V^\pi(s') \right) . \quad (10)$$

$$\triangleq T^\pi(V^\pi(s)) .$$

Où T^π est l'opérateur de Bellman. L'écriture de l'équation ci-dessus pour tous les états sous forme matricielle donne $V^\pi = T^\pi V^\pi = P^\pi R^\pi + \gamma P^\pi V^\pi$ où $P(i, j) = P(s_i, \pi(s_i), s_j)$ et $R^\pi(i, j) = R(s_i, \pi(s_i), s_j)$. L'équation ci-dessus peut être résolue sous forme fermée comme :

$$V^\pi = (1 - \gamma P^\pi)^{-1} P^\pi R^\pi \quad (11)$$

Où I est la matrice d'identité. Compte tenu de la fonction de valeur, la stratégie peut être améliorée par une mise à jour d'anticipation en une étape:

$$\pi(s) = \operatorname{argmax}_{a \in A} \sum_{s' \in S} P(s, a, s') [R(s, a, s') + \gamma V^\pi(s')] . \quad (12)$$

La réunion de ces deux phases (c'est-à-dire les équations 11 et 12 donnent la méthode d'itération de politique présentée dans l'algorithme 1). Notez que l'algorithme nécessite des calculs $\Theta(|S|^3)$ par itération pour évaluer la politique (ligne 4) et $\Theta(|A||S|^2)$ pour calculer la nouvelle politique (lignes 5, 6). Cependant, tant que la fonction de valeur se rapproche de la solution exacte, la boucle d'évaluation / d'amélioration de la

politique reste converge vers la solution optimale. Cette idée conduit à un processus qui économise des calculs substantiels pour trouver une bonne politique car, tant que le classement des actions dans chaque état est correct, le résultat de l'amélioration de la politique donne des sélections d'actions optimales. Pour tenir compte de cette idée, la ligne 4 peut être remplacée par la règle de mise à jour suivante, connue sous le nom de mise à jour de Bellman:

$$V^\pi(s) = \max_{a \in A} \sum_{s' \in S} P(s, a, s') [R(s, a, s') + \gamma V^\pi(s')], \quad \forall s \in S. \quad (13)$$

Où la valeur de chaque état est améliorée par une anticipation en une étape. Cette modification produit la méthode d'itération de valeur indiquée dans l'algorithme (2).

L'algorithme *d'itération de valeur* élimine l'étape d'inversion de matrice requise $\mathcal{O}(|A||S|^2)$ calculs par itération. Notez que la boucle interne nécessite une boucle sur tous les états. *L'itération de politique* et *l'itération de valeur* sont des instances de méthodes de programmation dynamique. Pour les grands espaces d'états, la représentation de la fonction de valeur à l'aide d'une table de recherche n'est pas possible en raison de restrictions de mémoire et de calcul. [35]

Algorithme (1) : Itération de politique [35]

Input : $\mathbf{R}, \mathbf{P}, \gamma$

Output: π

$\pi(s) \leftarrow \text{Random}(A)$ **for** $s \in S$

Changed \leftarrow **True**

While Changed **do**

$V^\pi \leftarrow (I - \gamma \mathbf{P}^\pi)^{-1} \mathbf{P}^\pi \mathbf{R}^\pi$
<p>For $s \in S$ do</p>
$\pi^+(s) \leftarrow \text{argmax}_{a \in A} \sum_{s' \in S} \mathbf{p}(s, a, s') [\mathbf{R}(s, a, s') + \gamma V^\pi(s')]$
Changed $\leftarrow (\pi^+ \neq \pi)$
$\pi \leftarrow \pi^+$

return π

Algorithme (2) : Itération de valeur [35]

Input: R, P, γ

Output: π

$V(s) \leftarrow \text{Random}()$ for $s \in S$

Changed \leftarrow False

repeat

for $s \in S$ **do**

$V \leftarrow V(s)$

$V(s) \leftarrow \max_{a \in A} \sum_{s' \in S} P(s, a, s') [R(s, a, s') + \gamma V^\pi(s')]$

$\pi(s) \leftarrow \operatorname{argmax}_{a \in A} \sum_{s' \in S} p(s, a, s') [R(s, a, s') + \gamma V^\pi(s')]$

 Changed \leftarrow Changed **or** $V \neq V(s)$

Until not changed

return π

4. Approche basée sur les règles de la théorie des jeux

4.1. Introduction

Le problème de planification multi-agents peut aborder d'autre façon [35] et cela dans Le domaine de la théorie des jeux, où les agents sont des entités décisionnelles individuelles qui effectuent des actions pour maximiser leur propre utilité locale sur la base de la connaissance des autres agents et de l'environnement. Pour modéliser des environnements non coopératifs les agents prennent des décisions individuelles sur leurs propres actions. Cependant, l'application de la coopération est difficile car elle implique de s'assurer que les fonctions d'utilité et les incitations des agents individuels sont alignées sur les objectifs de la mission globale. Par conséquent, le principal défi associé aux stratégies de planification coopérative de la théorie des jeux consiste à concevoir des fonctions utilitaires et des stratégies de négociation appropriées pour assurer des niveaux appropriés de coordination et de collaboration entre les agents afin de maximiser la performance globale de la mission.

4.2. Énoncé du problème

D'après [35] Le problème d'affectation de cible de véhicule est un problème multi-agents coopératif étudié couramment dans la littérature sur la théorie des jeux. Ce problème consiste à affecter un ensemble de N_a véhicules à un ensemble de N_c cibles

dans le but de maximiser l'utilité globale avec des véhicules pouvant avoir des caractéristiques variables et les cibles des valeurs de récompense différentes.

La formulation du problème consiste à sélectionner des affectations pour un ensemble de véhicules $I \triangleq \{1, \dots, N_a\}$ étant donné un ensemble de cibles $J \triangleq \{1, \dots, N_t\}$.

L'affectation ou l'action d'un véhicule $a_i \in A_i$, consiste à choisir une cible parmi un sous-ensemble autorisé de cibles $A_i \subset \{J \cup \emptyset\}$ où l'action \emptyset est une cible "nulle" ou une affectation vide et l'espace d'action total pour tous les véhicules est $A \triangleq A_1 \times \dots \times A_{N_a}$.

Un profil d'affectation conjointe $a \in A$ se compose d'un vecteur décrivant les actions de tous les agents, $a = (a_1, \dots, a_{N_a})$, et est parfois écrit comme un $a = (a_i, a_{-i})$ pour mettre en évidence l'action de l'agent i compte tenu des actions des autres agents a_{-i} . L'équation ci-après est utilisée par chaque agent (i) pour maximiser sa propre utilité locale

$$a_i^* = \operatorname{argmax}_{a_i \in A_i} U_i(a_i, a_{-i}) \quad (14)$$

Où a_i est l'affectation du véhicule i et a_{-i} est le profil d'affectation des autres véhicules.

4.3. Solutions algorithmiques

Selon la stratégie de négociation, les résultats stables de la plupart des algorithmes de jeu potentiels peuvent entraîner des (PSNE : Pure Strategies Nash Equilibrium) arbitrairement mauvais, motivant la conception de stratégies de négociation qui augmentent la probabilité de convergence vers un PSNE presque optimal. De plus, il est souhaitable que les véhicules négocient entre eux à chaque pas de temps compte tenu des affectations de tous les agents uniquement, sans nécessiter de connaissances internes sur les fonctions utilitaires ou l'état interne des autres véhicules. Plusieurs stratégies de négociation actuelles sont examinées dans [38], y compris des algorithmes tels que le jeu fictif basé sur l'action, le jeu fictif, la correspondance des regrets (et ses variantes) et le jeu adaptatif spatial, ainsi que les avantages et les inconvénients de chacun sont décrits.

Dans [38] les auteurs présentent des mécanismes de négociation issu de la littérature qui conduit à un équilibre de Nash optimal dans des jeux potentiels avec une probabilité arbitrairement élevée. Ces mécanismes adopteront divers algorithmes d'apprentissage disponibles dans la littérature pour les jeux multi-joueurs comme moyens de

négociation de véhicules pour utiliser les outils théoriques et informatiques fournis par la théorie des jeux. En particulier, chaque véhicule négociera avec d'autres véhicules sans aucune connaissance des utilités des autres véhicules. L'une des raisons d'une telle exigence est que les véhicules peuvent ne pas disposer des mêmes informations concernant leur environnement.

Ils ont examiné une sélection d'algorithmes d'apprentissage multi joueur disponibles dans la littérature. Ils ont introduit deux nouveaux algorithmes qui répondent aux exigences d'information et de calcul des algorithmes existants, à savoir, (generalized RM with fading memory and inertia), ce dernier pour permettre la convergence vers un équilibre pur dans les jeux potentiels, il va modifier l'appariement des regrets de deux manières. Premièrement, il supposera que chaque véhicule a une mémoire défaillante ; c'est-à-dire que chaque véhicule écarte de façon exponentielle l'influence de son regret passé dans le calcul de son vecteur de regret moyen. Deuxièmement, il supposera que chaque véhicule propose une cible basée sur son regret moyen actualisé en utilisant une certaine inertie. Le deuxième algorithme est le (SAP selective spatial adaptive play) pour les cas où un véhicule a un grand nombre de cibles dans son ensemble de cibles ou l'appel de son évaluateur de fonction d'utilité est coûteux en calcul.

5. Conclusion

Ce chapitre présente des méthodes d'allocation et de planification de tâches coopératives autonomes pour des équipes en réseau hétérogènes, en donnant un aperçu des nombreuses approches qui ont été envisagées dans la littérature. En particulier, trois cadres de planification standard sont discutés : la programmation en nombres entiers, les processus décisionnels de Markov et la théorie des jeux.

A decorative red scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

Chapitre III :
L'implémentation et
Simulation

1. Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les UAV et on a connu leurs types et les différents domaines d'utilisation. Nous savions également qu'il est préférable de les utiliser dans un réseau constitué d'un groupe d'UAV qui communique entre eux via FANET. Nous savions également que le modèle de mobilité de l'UAV affecte grandement le protocole de communication et même le niveau de consommation d'énergie de la batterie.

Dans le deuxième chapitre, nous avons cité les approches pour la planification et d'allocation des tâches coopératives pour un réseau multi-UAV autonomes et hétérogènes.

Dans ce chapitre, nous allons essayer de créer un nouveau modèle de mobilité basé sur les processus décisionnels de chaîne de Markov afin d'améliorer le mouvement et d'optimiser le trajet d'un groupe d'UAV en direction vers des sites présélectionnés pour les surveiller.

2. La Simulation [39]

La simulation est l'un des outils d'aide à la décision les plus efficaces à la disposition des concepteurs et des gestionnaires des systèmes complexes. Elle consiste à construire un modèle d'un système réel et à conduire des expériences sur ce modèle afin de comprendre le comportement de ce système et d'en améliorer les performances.

Les applications de la simulation sont innombrables. Parmi les domaines dans lesquels elle est le plus utilisée, on peut citer :

- L'informatique : recherche de configurations, réseaux, architecture de bases de données, ...
- La production : gestion des ressources de fabrication, machines, stocks, moyens de manutention, ...
- La gestion : marketing, tarification, prévisions, gestion du personnel,
- l'administration : gestion du trafic, du système hospitalier, de la démographie, ...
- L'environnement : pollution et assainissement, météorologie, catastrophes naturelles.

3. Simulateur Réseau

3.1. NS3 [40]

Le simulateur NS3 est un simulateur de réseau à événements discrets destiné principalement à la recherche et à l'enseignement. Il est sous licence GNU GPLv2 et est disponible pour la recherche et le développement-3. Il définit un modèle de procédure de travail des réseaux de données par paquets, et fournit un moteur de simulation. Plusieurs utilisateurs utilisent NS3 pour modéliser des systèmes non basés sur Internet. NS3 utilise deux langages clés comme son prédécesseur NS2. Le simulateur est entièrement écrit en C++ avec des liaisons python facultatives. Les scripts de simulation peuvent donc être écrits en C++ ou en Python. Des animateurs sont utilisés pour afficher visuellement les résultats. Les deux langages fonctionnent bien dessus.

NS3 fournit une bibliothèque solide qui est utile à l'utilisateur pour faire son travail en éditant NS-3 lui-même. Pour la technologie filaire, le NS-3 fournit un modèle de périphérique d'un simple réseau Ethernet qui utilise CSMA/CD comme schéma de protocole avec une attente croissante pour lutter pour le support de transmission partagé.

Il fournit également un ensemble de modèles 802.11 qui tentent de fournir une implémentation précise au niveau MAC de la spécification 802.11 et un modèle au niveau PHY de la spécification 802.11a.

3.2. GloMoSim [41]

Global Mobile Information System Simulator (GloMoSiM) est un environnement de simulation utilisé pour les réseaux sans fil à grande échelle. GloMoSiM utilise une simulation parallèle à événements discrets basée sur Parsec. De plus, GloMoSiM utilise le compilateur Parsec pour compiler la simulation de protocoles.

GloMoSiM est capable de simuler un réseau qui contient des milliers de nœuds et des liens de communication hétérogènes, par exemple des liens multicast et asymétriques. De plus, GloMoSiM prend en charge la communication directe par satellite, la communication sans fil multi-sauts et la plupart des protocoles Internet traditionnels. GloMoSiM est un simulateur séquentiel et parallèle basé sur une bibliothèque conçue uniquement pour les réseaux sans fil. GloMoSiM dispose d'une bibliothèque de simulation évolutive basée sur l'environnement de simulation Parsec. Il est développé comme un ensemble de modules de bibliothèque, dont chacun simule un protocole de communication sans fil spécifique dans la pile de protocoles.

3.3. OMNeT++

3.3.1. Définition

OMNeT++ est une bibliothèque et un framework de simulation C++ extensible, modulaire et basé sur des composants, principalement pour la construction de simulateurs de réseau. « Réseau » est entendu dans un sens plus large qui inclut les réseaux de communication câblés et sans fil, les réseaux sur puce, les réseaux de file d'attente, etc. Les fonctionnalités spécifiques à un domaine telles que la prise en charge des réseaux de capteurs, des réseaux ad hoc sans fil, des protocoles Internet, de la modélisation des performances, des réseaux photoniques, etc., sont fournies par des cadres de modèles, développés en tant que projets indépendants. OMNeT++ propose un IDE basé sur Eclipse, un environnement d'exécution graphique et une multitude d'autres outils. [42]

3.3.2. Architecture d'OMNET++

Le simulateur OMNET ++ est composé de modules. Un module peut être soit simple ou composé. À chaque module simple correspond un fichier .cc et un fichier .h. Un module composé regroupe en son sein des modules simples ou d'autres modules composés connectés entre eux. Les paramètres, les sous modules et les ports de chaque module sont spécifiés dans un fichier .ned. La communication entre les différents modules se fait par échanges de messages. Les messages sont envoyés et reçus à travers les ports qui représentent les interfaces d'entrée et de sortie de chaque module. La conception d'un réseau se fait dans un fichier .ned et les différents paramètres de chaque module sont spécifiés dans le fichier de configuration (.ini). À la fin de chaque simulation, OMNET ++ génère deux nouveaux fichiers. vec et .sca. Ces fichiers permettent de faire les statistiques [43]. La figure suivante montre l'architecture modulaire d'omnet++.

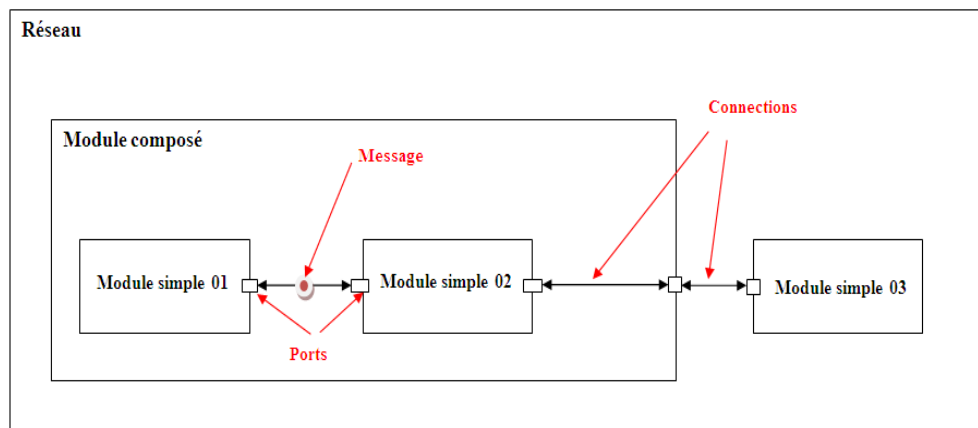


Figure 12 :L'architecture modulaire d'omnet++.

4. Comparaison entre simulateurs réseaux

Le tableau [40] ci-dessous montre quelque avantages pour les trois simulateurs réseau (Omnet++, NS3 et GloMoSiM) et ses limites.

Tableau 5: Comparaison entre Simulateurs réseaux.

	Les avantages	Les limites
Omnet++	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fournit un environnement GUI puissant. ✓ Le traçage et le débogage 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Il n'offre pas une grande variété de protocoles et très peu de protocoles ont été mis en œuvre,

	<p>sont beaucoup plus faciles que les autres simulateurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Modéliser avec précision la plupart du matériel et inclure la modélisation des phénomènes physiques. 	<p>laissant aux utilisateurs un travail de fond important.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Mauvaise analyse et gestion des performances typiques. ➤ L'extension de la mobilité est relativement incomplète.
NS3	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Haute modularité que son ancêtre NS2. ✓ Prise en charge de la simulation pour les protocoles TCP, UDP, ICMP, IPv4, routage multidiffusion, P2P et CSMA. ✓ La prise en charge du code porté devrait rendre la validation du modèle plus facile et plus crédible. ✓ Beaucoup plus flexible que tout autre simulateur. ✓ Large gamme d'utilisation à la fois dans l'optimisation et l'extension des réseaux existants. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ NS3 souffre toujours d'un manque de crédibilité. ➤ NS3 est destiné à reproduire le mode réussi de NS2 dans lequel de nombreuses organisations différentes ont contribué aux modèles et composants basés sur le cadre de NS2. ➤ NS3 a besoin de beaucoup de mainteneurs spécialisés afin de profiter des avantages de NS3 en tant que simulateurs de réseau OPNET commerciaux. ➤ Les mainteneurs actifs sont tenus de répondre aux questions des utilisateurs et aux rapports de bogues, et d'aider à tester et valider le système.
GloMoSiM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ GloMoSim Fournit une simulation modulaire pour la pile de protocoles. ✓ Il est capable de s'adapter à des réseaux avec des milliers de nœuds hétérogènes. ✓ L'exécution du modèle parallèle est fournie aux utilisateurs de manière transparente [21]. ✓ Il est gratuit pour l'enseignement et la 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La documentation de GloMoSimis assez pauvre. Pas de protocoles de routage spécifiques pour le réseau de capteurs, pas de modèles de consommation d'énergie pour la couche de transport et la prise en charge des adresses IP. ➤ Il fournit le modèle de mobilité Random Waypoint, qui peut ne pas convenir à tous les types de simulations.

	recherche.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La mise à jour de ce simulateur n'est pas régulière puisque l'équipe de développeurs vise principalement QualNet qui est la version commerciale de GloMoSim. ➤ Prise en charge PARSEC de Redhat 7.2 qui est obsolète.
--	------------	--

5. Framework INet

Le framework INET peut être considéré comme la bibliothèque de modèles de protocole standard d'OMNeT++. INET contient des modèles pour la pile Internet et de nombreux autres protocoles et composants. Le framework INET est maintenu par l'équipe OMNeT++ pour la communauté, en utilisant des correctifs et de nouveaux modèles fournis par les membres de la communauté. Plusieurs autres cadres de simulation prennent INET comme base et l'étendent dans des directions spécifiques, telles que les réseaux de véhicules (Veins, CoRE), les réseaux superposés/peer-to-peer (OverSim) ou LTE (SimuLTE). [42]

INET est construit autour du concept de modules qui communiquent par passage de messages. Les agents et les protocoles réseau sont représentés par des composants, qui peuvent être librement combinés pour former des hôtes, des routeurs, des commutateurs et d'autres périphériques réseau. De nouveaux composants peuvent être programmés par l'utilisateur et les composants existants ont été écrits de manière à être faciles à comprendre et à modifier. [44]

INET bénéficie de l'infrastructure fournie par OMNeT++. Au-delà de l'utilisation des services fournis par le noyau et la bibliothèque de simulation OMNeT++ (modèle de composant, paramétrage, enregistrement des résultats, etc.), cela signifie également que les modèles peuvent être développés, assemblés, paramétrés, exécutés et leurs résultats évalués dans le confort de l'IDE de simulation OMNeT++ ou à partir de la ligne de commande. [44]

6. Implémentation

En respectant le principe de l'approche basée sur les processus décision markovien et afin d'implanter l'algorithme 02 cité dans le chapitre 02 on a défini 30 sites (de 0 à 29) capables à êtres visités par 5 UAV disponibles dans le Park, (Figure 13)

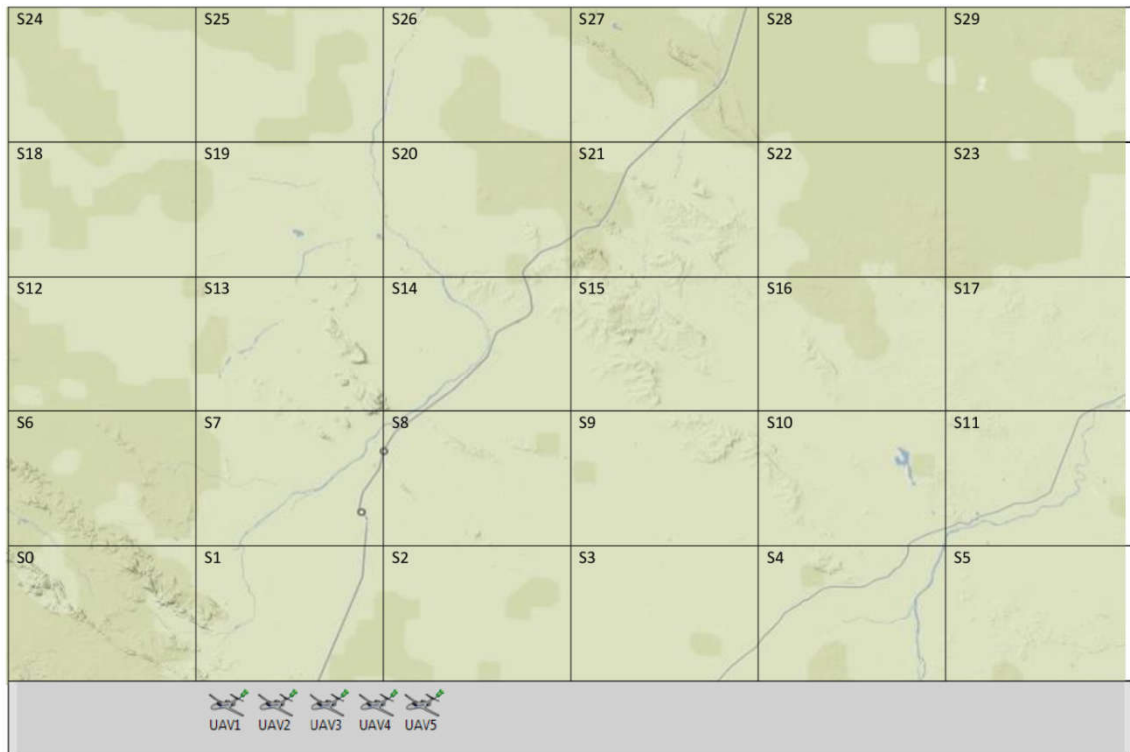


Figure 13 : les 05 UAV et les 30 sites.

Tel que chaque UAV dans un site peut choisir d'aller vers une direction parmi les 04 directions (les actions) possibles (Nord, Sud, East, Ouest) (Figure 14)

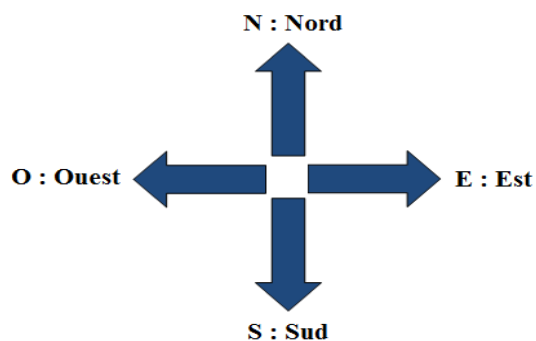


Figure 14 : les quartes directions

6.1. Principe de fonctionnement

Comme la montre la figure ci-dessous l'application au début passe par un processus de paramétrage (définition des sites obstacles et les sites de départ/arrivée pour chaque UAV) et enfin lancement de la simulation.

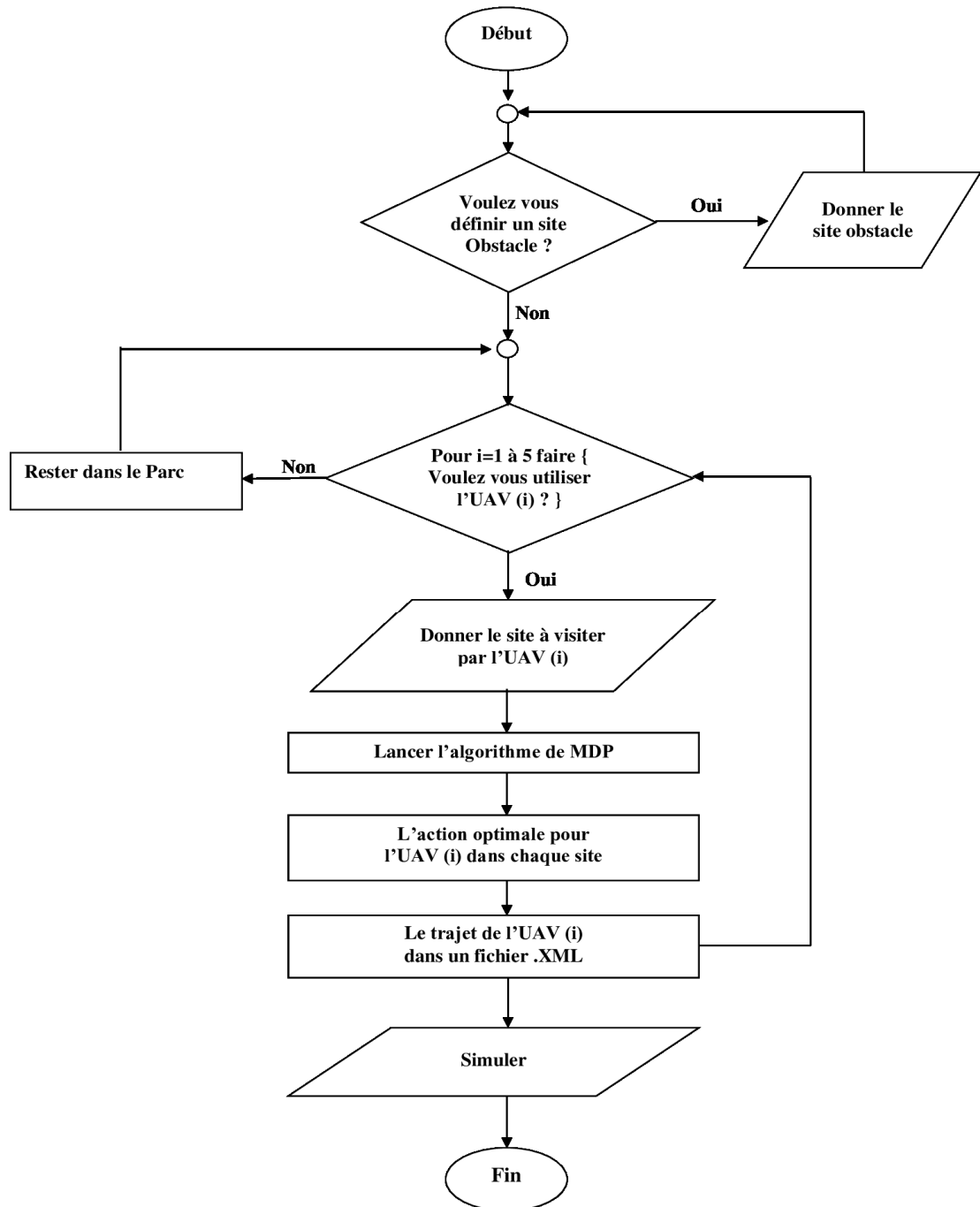


Figure 15: Schéma de principe de fonctionnement de l'application.

NB : on a défini un site obstacle comme l'endroit qui présente un danger pour l'UAV ou obstrue son mouvement : les montagnes par exemples.

6.2. Etude de Cas

Comme le montre le tableau ci-dessous, on a fixé pour chaque UAV l'objectif de démarrer d'un site (départ) et de visiter un autre (Arrivée):

Tableau 6: les sites de (départ/arrivée) pour chaque UAV.

Sites	Site de Départ	Site d'arrivée
UAV		
UAV1	S0	S25
UAV2	S0	S26
UAV3	S0	S27
UAV4	S0	S28
UAV5	S0	S29

Pour observer et étudier le comportement de chaque UAV on a sélectionné les deux cas suivants :

Cas 01: Sans obstacles

Dans ce cas le trajet de chaque UAV après la simulation est illustré dans la figure suivante :

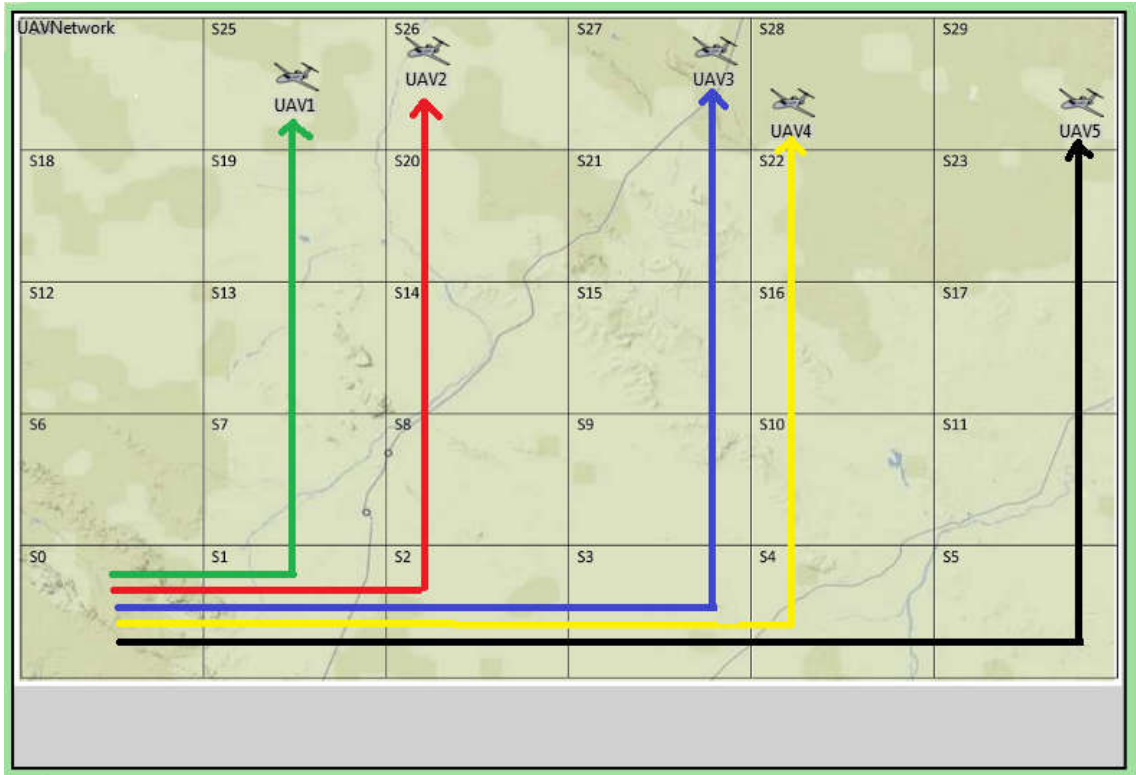


Figure 16 : trajectoires dans le cas sans obstacles.

* On peut remarquer que les UAV dans chaque site ont choisi l'action correcte dont leur permettre à la fin d'atteindre ses destinations et aussi d'optimiser ses trajet en suivant le chemin le plus court.

Cas 02: Avec Obstacles

On a défini les sites (8, 10, 13, 21, 23, 24) comme des obstacles pour les UAV.

La figure (17) montre le trajet de chaque UAV à la fin de simulation.

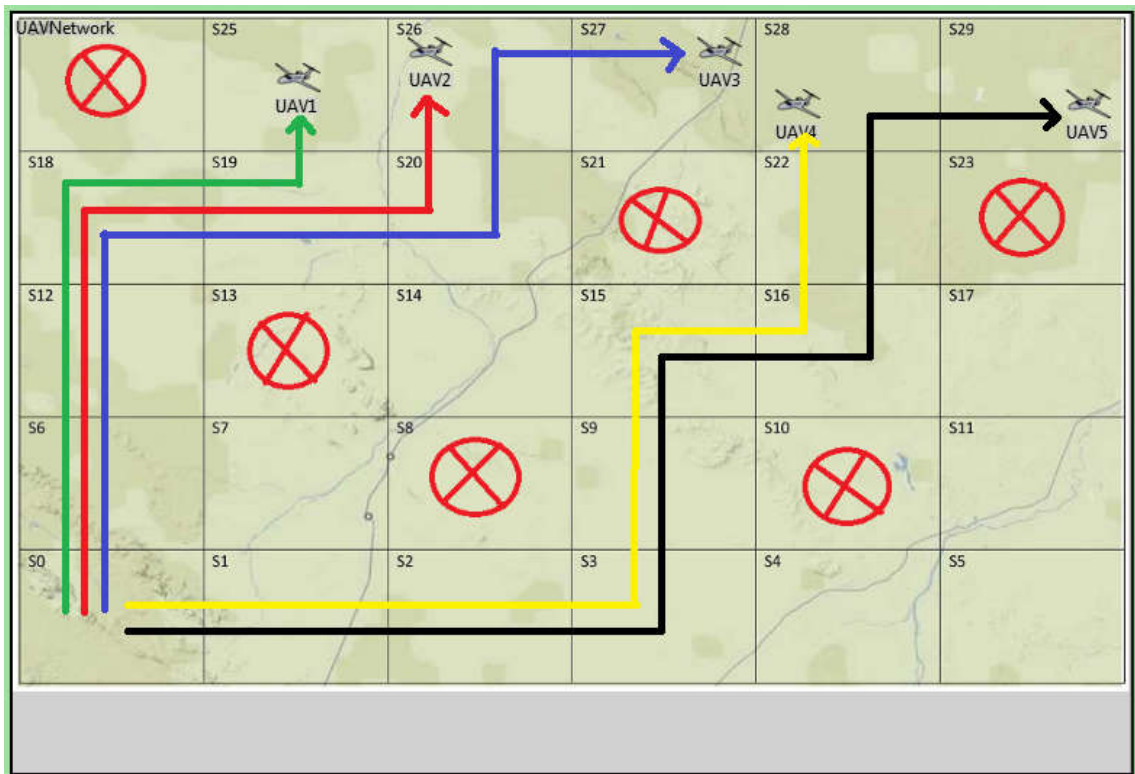


Figure 17 : trajectoires dans le cas avec obstacles.

* On peut remarquer les UAV dans chaque site ont choisi l'action correcte dont leur permettre à la fin d'atteindre ses destinations, d'optimiser ses trajet en suivant le chemin le plus court et en plus d'éviter les sites obstacles.

7. Conclusion

A travers le processus de simulation que nous avons réalisé au niveau du simulateur Omnate++, nous avons constaté qu'une flotte de drones connectés entre eux via un réseau FANET peut se rendre à certains endroits et sites afin de les surveiller et aussi ils peuvent optimiser leurs trajet en choisissant le plus court chemin leur permettre d'atteindre ses destinations et de maintenir leurs sécurité en s'appuyant sur un processus de décision markovien (MDP).

A red scroll graphic with a dark red border and rounded corners. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curling inward. The text is centered on the unrolled portion.

**CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES**

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale

Après avoir terminé ce projet de recherche en permettant à un flotte d'UAV connectés via un réseau FANET de choisir le chemin optimal qui leur permet d'atteindre sa destination en suivant le chemin le plus court, de réduire ainsi le temps d'exécution des tâches et d'économiser l'autonomie des batteries, tout en évitant les endroits dangereux et assurant leur sécurité, nous avons conclu que la plupart des algorithmes d'aide à la prise de décision et approches dédiés pour la planification et d'allocation des tâches coopératives pour un réseau multi-UAV autonomes et hétérogènes sont très complexe et elle fait l'objet de recherches par les chercheurs afin de l'améliorer.

Quelques perspectives

- Amélioration notre projet en donnant plus d'actions aux UAV lui permettre d'atteindre ses destinations plus vite.
- Une étude comparative de ce modèle mobilité basé sur les MDP avec d'autres modèles existants.
- Coopération avec d'autres chercheurs dans le domaine des UAV et l'intelligence artificielle pour faire de ce projet une réalité.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] - <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/aeronautique-drone-6174/05/05/2021> à 8 :30.
- [2] - J. A. Maxa, " Architecture de communication sécurisée d'une flotte de drones", Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier,2017.
- [3]- L. Sofiane, M. Achref , < Contribution à l'étude et réalisation d'un Quadrotor hybride UAV/UGV> Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur , Filière et Spécialité : Automatique , école supérieure en sciences appliquées (ESSA) Tlemcen,2020
- [4]- A.M.Yacine,Mr.O.Adel < Techniques d'observation du quadrirotor autonome>Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme Master Filière et Spécialité : Automatique, école supérieure en sciences appliquées (ESSA) Tlemcen,2020.
- [5]- A. M. Yacine , O. Adel <Contrôle non-linéaire pour la stabilisation et le suivi de trajectoire d'un Quadrirotor>, Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur, Filière et Spécialité : Automatique, école supérieure en sciences appliquées (ESSA) Tlemcen,2020.
- [6]- M. Hassanalian, A.Abdelkefi,< Classifications, applications, and design challenges of drones: A review>, Aerospace Sciences · May 2017
- [7]- C. Antoine, D. Benjamin, H. Audouard , N. T. Nam,S. P. Libasse, < Les Drones> support de cours 3eme Année, Electronique et Informatique Industrielle, institut national des sciences appliquées, Rennes. 2015 ou+
- [8]- S. G. Gupta, Mangesh M. Ghonge, Dr. P. M. Jawandhiya,< Review of Unmanned Aircraft System (UAS)>, International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), Volume 2, Issue 4, April 2013.
- [9]- J. A. Maxa,B. M. Slim, N. Larrieu,< Survey on UAANET Routing Protocols and Network Security Challenges>,Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, PKP Publishing Services Network, 2017.
- [10]-O.S.Oubbatia,L.Abderrahmane,F.Zhouc, M. Gunes,Y. M.Bachir,< A survey on position-based routing protocols for Flying Adhoc Networks (FANETs)>, Vehicular Communications10,2017.

Références bibliographiques

- [11]- I. A. Sumra, P. Sellappan, A. Abdullah , A. Ali,<Security issues and Challenges in MANET-VANET-FANET: A Survey > EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies, April 2018
- [12]- M.A.Khan, I.M.Qureshi, F.Khanzada, <A Hybrid Communication Scheme for Efficient and Low-Cost Deployment of Future Flying Ad-Hoc Network (FANET)>,MDPI ,2019.
- [13]- E.Mouna, I.Hanen, A.S.Leila, D.Riadh, E.Benoît,< Unmanned Aerial Systems: Overview and Open Challenges>, 4th International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN 2015), ENSI : Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique, Campus Universitaire de la Manouba, Tunisie, Nov 2015, Hammamet, Tunisia.
- [14]- https://www.skybrary.aero/index.php/category:unmanned_aerial_systems 05/05/2021 a 8 :30.
- [15]- I.U.KHAN,I.M.QURESHI,M.A.AZIZ,T.A.CHEEMA1,A.S.BILAL, H. SHAH,< Smart IoT Control-Based Nature Inspired Energy Efficient Routing Protocol for Flying Ad Hoc Network (FANET)>, IEEE Access · March 2020.
- [16] - C.M. Cheng, P.H. Hsiao, H. T. Kung, et D. Vlah, “Maximizing throughput of UAV-relaying networks with the load-carry-and-deliver paradigm,” .IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2007.
- [17] - Y. Zhou, N. Cheng, N. Lu, and X. S. Shen, “Multi-UAV-aided networks: Aerial-ground cooperative vehicular networking architecture,” IEEE Vehicular Technology Magazine. 2015
- [18] - M. Erdelj, M. Król, et E. Natalizio, “Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management,” Computer Networks. 2017
- [19] - K.R.Khan, R.U.Zaman, A.V.Reddy, K. A.Reddy; T. S.Harsha "An Efficient Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", International Conference on Computer Science and Information Technology.2008
- [20] - J.M.Ahmed, M.Salama, M.R.Chandren, M.Hairulnizam et al, "Bat Optimized Link State Routing Protocol for Energy-Aware Mobile Ad-Hoc Networks", Symmetry 2019
- [21]- I.D.Chakeres, E.M. Belding-Royer et al "AODV routing protocol implementation design", International Conference on Distributed Computing Systems Workshops 2004.

Références bibliographiques

- [22]- F.Didi, B.Bouyedou, M.Feham, H.Labiod "Mobility Impact on DSR-Based Power-Aware Ad hoc Routing Protocol", *New Technologies, Mobility and Security* 2008
- [23]- H.Nurwarsito, M.Y.Umam , "Performance Analysis of Temporally Ordered Routing Algorithm Protocol and Zone Routing Protocol on Vehicular Ad-Hoc Network in Urban Environment", 3rd ISRITI 2020
- [24]- A.Silva; K.M.N.Reza, A.Oliveira, "An Adaptive GPSR Routing Protocol for VANETs", 15th (ISWCS) 2018
- [25]- A.G.Perez , A.M.Montoya, J.C.S.Aarnoutse et M.D.Cano "A Comparative Performance Evaluation of Routing Protocols for Flying Ad-Hoc Networks in Real Conditions", *MDPI Applied science* 2021
- [26] - F.AFTAB, A.KHAN, Z.ZHANG, "Hybrid Self-Organized Clustering Scheme for Drone Based Cognitive Internet of Things", *IEEE Access (Vol 7)* 2019
- [27]- D.S.Lakew, U.Sa'ad, Nhu-Ngoc Dao, W.Na, and S.Cho, < Routing in Flying Ad Hoc Networks: A Comprehensive Survey>, *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS*, MARCH 2020.
- [28]- R.Karp, "Reducibility among Combinatorial Problems", 1972
- [29]- T.Shima, S.J.Rasmussen, et A.G.Sparks, "UAV Cooperative Multiple Task Assignments using Genetic Algorithms", *American Control Conference*, 2005.
- [30]- Z.WANG, L.LIU, T.LONG, Y.WEN, "Multi-UAV reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using an opposition-based genetic algorithm with double-chromosome encoding", *Chinese Journal of Aeronautics* 2017.
- [31]- J.L.Ryan, T.G.Bailey, J.T.Moore, W.B.Carlton, " Reactive Tabu Search in unmanned aerial reconnaissance simulations". *Winter Simulation Conference* 1998
- [32]- N.D. Manh, L.T.H. An, P.D. Tao, "A cross-entropy method for nonlinear UAV task assignment problem", *ICCCT* 2010.
- [33]- H.Chen; F.Jiyu, "UAV Path Planning Based on Particle Swarm Optimization with Global Best Path Competition", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 2017.
- [34]- S.Rathinam, R.Sengupta, S.Darbha, "A resource allocation algorithm for multivehicle systems with nonholonomic constraints". *IEEE TASE*.2007.
- [35]- *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles* Editor/Author Valavanis, Kimon P. and Vachtsevanos, George J. Publication Year: 2015 Publisher: Springer Science+Business Media

Références bibliographiques

- [36]- Processus Décisionnels de Markov en Intelligence Artificielle ,group PDMIA ;27 février 2008
- [37]- https://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_de_d%C3%A9cision_markovien
à 30/08/2021 19 :50
- [38]- G.Arslan, J.R.Marden, J.S.Shamma, "Autonomous Vehicle-Target Assignment: A Game-Theoretical Formulation", Journal of Dynamic Systems Measurement and Control 2007.
- [39]- <https://www.emse.fr/~grimaud/Simulation/CoursRapide/CoursRapide.htm> le 04/09/2021 à 23:00
- [40]- M.HumayunKabir, S.Islam, Md.J.Hossain, S.Hossain, "Detail Comparison of Network Simulators" , October 2014
- [41]- A.U.Khan, S.M.Bilal, M.Othman, "A Performance comparison of Network Simulators for Wireless Networks"
- [42]- <https://omnetpp.org/intro/> le 04/09/2021 à 20:00
- [43]- A.Adigun <Gestion de l'anonymat et de la traçabilité dans les réseaux véhiculaires sans fil > Mémoire Présenté A L'université Du Québec A Trois-Rivières février 2014
- [44]- INET Framework User's Guide, OpenSim Ltd, Jan 28, 2019.