

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

TITRE

**Optimisation topologique des essaims de drones par la modélisation de la répulsion des paires
électroniques de la couche de valence modifiée**

ESSAI PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT

GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

MOUSSA DOGOUMI MAHAMAT

DÉCEMBRE 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (PH.D.)

Direction de recherche :

Professeur Adam SKOREK,	directeur de recherche
-------------------------	------------------------

Jury d'évaluation

Professeur Hamidou TEMBINE	Président du jury
----------------------------	-------------------

Professeur Ahmed LAKHSSASI	Évaluateur interne
----------------------------	--------------------

Docteur Fidèle MOUPFOUMA	Évaluateur externe
--------------------------	--------------------

Professeur Adam SKOREK, Université du Québec à Trois-Rivières	Directeur
---	-----------

Pour le doctorat ajouter :

Thèse soutenue le x mois année

Résumé

Les progrès technologiques et des réseaux de capteurs facilitent l'intégration de dispositifs électriques et non électriques. Ils génèrent des services de télécommunications mobiles à forte demande en débit. Cette demande révèle les limites des réseaux actuels. Elle favorise l'émergence de réseaux ad hoc d'intelligence collaborative. Cette dernière désigne la capacité des drones à collaborer de manière autonome pour des tâches complexes. Elle combine télécommunications, robotique et intelligence artificielle. Ce sous-domaine des systèmes multi-agents s'inspire des phénomènes dans la nature comme colonies d'insectes et des vols d'oiseaux.

Depuis deux décennies, l'essor des drones, tant militaires que civils, a favorisé la production de petits drones économiques au détriment de drones uniques plus grands. Cette évolution privilégie la collaboration d'ensembles de petits drones pour accomplir des tâches spécifiques. Elle bouleverse les technologies de réseaux existantes, nécessitant de nouvelles techniques adaptées. Ces essaims doivent non seulement exécuter leurs missions, mais aussi assurer une communication intra- et inter-ensemble, tout en relayant des données en temps réel vers la station de base. Leur forte mobilité et la topologie dynamique du réseau rendent les approches classiques des réseaux ad hoc mobiles, comme les réseaux véhiculaires, inadaptées en termes de canal de communication, de routage et de qualité de service

Cette thèse propose une optimisation topologique des réseaux ad hoc mobiles d'essaims de drones à topologie variable, via une modélisation modifiée de la répulsion des paires électroniques. Cette architecture exploite la répulsion et l'attraction des nœuds autour d'un centre pour optimiser la transmission et la mobilité des essaims de drones. Conçue pour une

intégration aisée, cette optimisation résout les contraintes des réseaux d'essais, assurant une couverture spatiale et une qualité de service optimales.

Avant-propos

Et voilà, j'y suis ! Après des années de travail acharné pour rédiger cette thèse, je pensais que la partie des remerciements serait une formalité rapide. Quelle erreur ! Exprimer ma gratitude s'est révélé plus complexe que prévu, tant les soutiens qui m'ont porté sont précieux.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury, **Professeur Hamidou Tembine, Professeur Ahmed Lakhssassi et Docteur Fidèle Moupfouma**, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Leur temps précieux et leurs suggestions pertinentes ont grandement enrichi cette thèse, et je leur suis profondément reconnaissant.

Je dois une profonde gratitude au **Professeur Adam W. Skorek**, mon directeur de recherche, pour la confiance qu'il m'a accordée, me laissant une liberté dans mes travaux tout en m'offrant des conseils avisés et son expertise lorsque nécessaire. Sa guidance a été essentielle à la réussite de ce projet.

Je remercie chaleureusement **Professeur Adel Dahmane Omer**, qui m'a initié à la recherche et ouvert les portes de cette thèse. Ses discussions enrichissantes et son soutien ont été déterminants dans mon parcours.

Je ne saurais oublier mes parents, dont le soutien indéfectible a été ma force. À mon père, une gratitude éternelle : sa patience et son encouragement constant ont rendu cette thèse possible. Merci, papa, je te serai toujours reconnaissant.

Un immense merci à mes petits frères et sœurs pour leur présence tout au long de ce voyage, ainsi qu'à mes amis pour leur soutien indéfectible dans les moments de doute.

Enfin, ma plus profonde reconnaissance va à ma femme, **Djamila Ousman Mahamat**, et à nos enfants. À Djamila, merci pour ta patience, ton amour et ton soutien durant ces années d'éloignement et d'épreuves. Ce doctorat est aussi le tien. À mes enfants, vous êtes ma plus grande inspiration.

À tous ceux qui ont contribué à ce cheminement, un merci sincère. Cette thèse est le fruit d'un effort collectif.

Table des matières

Résumé.....	iv
Avant-propos.....	vi
Table des matières.....	viii
Liste des équations	xvi
Liste des tableaux.....	xvii
Liste des figures	xviii
Liste des symboles	xx
Chapitre 1 - Définitions et Introduction.....	25
1.1 Définitions.....	25
1.1.1 Drones.....	25
1.1.2 UAV.....	25
1.1.3 UAS	26
1.1.4 Drone et UAV.....	26
1.2 Introduction	27
1.3 Types des réseaux ad hoc mobiles	31
1.3.1 MANET	31

1.3.2	VANET	31
1.3.3	FANET.....	31
1.3.4	Différences entre MANET, VANET, FANET	32
1.4	Application des drones	33
Chapitre 2 - Éléments constitutifs et la problématique		39
2.1	Les objectifs de la thèse.....	39
2.2	Cadre général.....	41
2.3	Limites technologiques entre un drone et un FANET	42
2.4	Vers des solutions adaptées aux contraintes des FANET	43
2.4.1	Communication en réseau maillé adaptatif.....	43
2.4.2	Stratégies de coordination distribuée	44
2.4.3	Fusion des données coopérative	45
2.4.4	Planification de mission en temps réel	46
2.4.5	Maintenance prédictive et surveillance l'état du réseau	47
2.4.6	Tolérance aux pannes et reconfiguration	48
2.5	Les différents types de maintenance industrielle	49
2.6	Présentation de la recherche	54
2.7	Conclusion.....	64
Chapitre 3 - Méthodologie et Impact de la topologie sur le réseau FANET		66

3.1	Méthodologie.....	66
3.1.1	Introduction : contexte, objectifs, structure	66
3.1.2	Impact de la topologie : défis et enjeux	67
3.1.3	Une architecture topologique dédiée : proposition de la topologie VSEPR.....	68
3.1.4	Perspectives : optimisation de la fiabilité des nœuds centraux	70
3.2	Généralités sur la théorie VSEPR : principes et fondements	73
3.2.1	Le modèle de Lewis : une étape préalable à l'application de VSEPR.....	73
3.2.2	Principes fondamentaux de la théorie VSEPR	74
3.3	Description des principes de la théorie VSEPR	75
3.4	Règles de base de la théorie VSEPR	77
3.5	Détermination des géométries moléculaires avec la théorie VSEPR..	80
3.6	Adaptation de la théorie VSEPR pour la conception de la topologie des FANET.....	82
3.7	Algorithme de positionnement des nœuds basé sur VBCA	84
3.8	Les différentes étapes	86
3.9	Travaux Publiés sur la topologie	87
3.9.1	Les conditions de test.....	88
3.9.2	Tests et simulations.....	90

3.10 Conclusion.....	91
Chapitre 4 - Reconfiguration dynamique de la topologie	93
4.1 Revue de la littérature approfondie sur la topologie	93
4.1.1 Ressources et bases de données	93
4.1.2 Revue de la littérature	94
4.2 Les avantages de la topologie par VSEPR	101
4.2.1 Synthèse des approches existantes et positionnement de la topologie VSEPR-VBCA	101
4.2.2 Lacunes des approches existantes	102
4.2.3 Positionnement de la topologie VSEPR-VBCA.....	102
4.2.4 Contributions et perspectives.....	103
4.2.5 Avantages et impact.....	103
4.3 Les limites de la topologie VSEPR	104
4.3.1 Rappel de la topologie VSEPR-VBCA	104
4.3.2 Limites liées à la dépendance au nœud central.....	105
4.3.3 Impact de la perte d'un nœud central.....	105
4.3.4 Rigidité topologique	106
4.3.5 Manque d'adaptabilité	107
4.3.6 Problématique et motivation.....	109
4.4 Définition du fonctionnement global du réseau	109

4.4.1	Les contraintes sur le nœud central.....	109
4.4.2	La perte d'un nœud central	111
4.4.3	Les communications au sein du réseau.....	113
4.5	Récupération d'un nœud périphérique	117
4.5.1	Détection de la perte du nœud central	117
4.5.2	Repositionnement des nœuds secondaires	118
4.5.3	Description de l'algorithme	119
4.6	Algorithme de repositionnement et redimensionnement.....	120
4.7	Travaux publiés sur la qualité de service	125
4.7.1	Méthodologie des simulations	125
4.7.2	Résultats et analyse	126
4.7.3	Discussions et limites.....	131
4.8	Conclusion.....	133
Chapitre 5 - Réseau dynamique bayésien : Optimisation du réseau		135
5.1	Fondements théoriques des réseaux dynamiques bayésiens	135
5.1.1	Introduction et contexte	135
5.1.2	Définitions	135
5.1.3	Utilisations des réseaux dynamiques et réseaux bayésiens dynamiques	137
5.1.4	Formalisme des réseaux bayésiens	140

5.1.5	Formalisme des réseaux bayésiens dynamiques	142
5.2	Problématiques d'un nœud central	143
5.2.1	Les contraintes énergétiques dans un nœud central	144
5.2.2	Cadences de communication	145
5.2.3	Nombre de nœuds périphériques	147
5.3	Synthèse et justification de l'approche RBD	147
5.4	Limites des RBDs.....	148
5.4.1	Propriété de Markov et biais dans la modélisation des défaillances	148
5.4.2	Solutions et autres limites	149
5.5	Conclusion.....	150
Chapitre 6 - Évaluations des performances avec RBD		152
6.1	Paramètres probabilistes	152
6.1.1	Importance de la prédiction dans les FANET	152
6.1.2	Variables influençant la dégradation de la batterie.....	153
6.1.3	Limites des approches existantes et justification des RBD ...	155
6.2	Structure graphique	156
6.2.1	Graphe de causalité initial.....	157
	157	
6.2.2	Simplification du graphe.....	159

6.2.3	Variables et états	161
6.3	Observations	164
6.3.1	Probabilités initiales.....	164
6.3.2	Graphe temporel et transitions.....	166
6.3.3	Observation et prédiction de l'état de la batterie	168
6.3.4	Mécanismes d'économie d'énergie et maintenance	169
6.4	Inférences	171
6.4.1	Définition	174
6.4.2	Généralisation	174
6.5	Étude du modèle graphique probabiliste	175
6.5.1	aGrum	177
6.5.2	pyAgrum	178
6.5.3	Modélisation et simulation.....	179
6.5.4	Facteurs potentiels non modélisés et hypothèse principale ...	198
6.6	Limites et perspectives :	200
6.7	Diagramme d'influence et analyse quantitative	201
6.8	Validation avec régression logistique et XGBoost.....	203
6.9	Conditions de test	205
Chapitre 7 - Conclusion et perspectives.....		210

7.1 Conclusion.....	210
7.2 Perspectives	213
Bibliographie.....	217
Index	239
Annexe A – Algorithme de reconfiguration	240
Annexe B – Les Plateformes.....	245

Liste des équations

Équation 1 : Calcul des Coordonnées	85
Équation 2 : Calcul des Coordonnés suite.....	86
Équation 3 : Calcul de la latence maximale.....	114
Équation 4 Calcul de latence	117
Équation 5 : Définition des probabilités	140
Équation 6 : Probabilité conditionnelle	140
Équation 7 : Probabilité conditionnelle suite.....	142
Équation 8 : Probabilité dynamique.....	143
Équation 9 : Probabilité dynamique en fonction du temps	170
Équation 10 : Probabilité jointe.....	174
Équation 11 : Probabilité état de la batterie.....	175
Équation 12 Régression logistique	203
Équation 13 Régression logistique avec les variables contextuelles	204
Équation 14 États de la batterie.....	204
Équation 15 Capture de la synergie des termes $Nbt \cdot Cft$, $Nbt \cdot Ebt$ et $Cft \cdot Ebt$	204
Équation 16 XGBoost avec les synergies	205

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 Règle de base.....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 2 Géométrie de base [68], [69].....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 3 Variables et États</i>	<i>163</i>
<i>Tableau 4 Exemple des probabilités à priori</i>	<i>165</i>
<i>Tableau 5 Probabilités initiales</i>	<i>176</i>
<i>Tableau 6 Probabilité à priori.....</i>	<i>185</i>
<i>Tableau 7 Cadence de fonctionnement quand le Nbc est élevé.....</i>	<i>186</i>
<i>Tableau 8 État de la batterie en fonction de la cadence.....</i>	<i>186</i>
<i>Tableau 9 Les différentes plateformes</i>	<i>245</i>

Liste des figures

Figure 1 Évolution du marché des drones	30
Figure 2 Évolution du marché des drones	30
Figure 3 Différence entre MANET, VANET et FANET	32
Figure 4 Plateformes à voilure fixe.....	36
Figure 5 Plateforme à rotor.....	36
Figure 6 Plateforme à voilures tournantes.....	37
Figure 7 Géométrie de la molécule de méthane	81
Figure 8 Géométrie selon le nombre de doublets [70]	81
Figure 9 Géométrie issue de VSEPR appliquée aux FANET [71].....	83
Figure 10 Un exemple de cluster.....	84
Figure 11 Débit VBCA vs Random	90
Figure 12 Zone de couverture VSEPR vs Random	90
Figure 13 Mécanisme au lancement	120
Figure 14 Algorithme de reconfiguration et de repositionnement.....	124
Figure 15 End-to-End Delay VBCA vs Random	128
Figure 16 Packets delivery ratio.	128
Figure 17 Probability of improvement	129
Figure 18 Packets dropped.....	129
Figure 19 Positionnement des clusters	130
Figure 20 Relative Power (dB)	130
Figure 21 Exemple de Réseau bayésien.....	141
Figure 22 Graphe de causalité.....	156
Figure 23 Graphe Cluster.....	157
Figure 24 Simplification du graphe	161
Figure 25 Graphe temporel et Transition	168

<i>Figure 26 Réseau dynamique</i>	<i>171</i>
<i>Figure 27 Les changements d'états de la cadence fonctionnement</i>	<i>173</i>
<i>Figure 28 Architecture de pyAgrum et aGrum [142]</i>	<i>179</i>
<i>Figure 29 Transition temporelle</i>	<i>180</i>
<i>Figure 30 Modélisation dans pyAgrum</i>	<i>181</i>
<i>Figure 31 Le réseau à deux pas</i>	<i>181</i>
<i>Figure 32 Le réseau au pas de 5</i>	<i>182</i>
<i>Figure 33 Inférence de la batterie</i>	<i>183</i>
<i>Figure 34 Suivant le nombre de communication.....</i>	<i>187</i>
<i>Figure 35 Suivant le nombre de communication.....</i>	<i>187</i>
<i>Figure 36 Suivant la cadence de fonctionnement</i>	<i>189</i>
<i>Figure 37 Évolution d'état de la batterie.....</i>	<i>194</i>
<i>Figure 38 Probabilité de défaillance.....</i>	<i>196</i>
<i>Figure 39 Impact de différentes variables sur la défaillance.....</i>	<i>198</i>
<i>Figure 40 Diagramme d'influence</i>	<i>201</i>
<i>Figure 41 Carte thermique sur 0-50</i>	<i>202</i>
<i>Figure 42 Différentes matrices de confusion.....</i>	<i>206</i>
<i>Figure 43 Courbe des modèles</i>	<i>208</i>
<i>Figure 44 Comparaison de probabilités</i>	<i>209</i>

Liste des symboles

Probabilités et théorie des graphes

$G = (V, \varepsilon)$	Graphe orienté
Ω_{V_i}	Espace fini et dénombrable des nœuds
ε	Ensemble des arcs
$V = (V_1, \dots, V_n)$	Ensemble de nœuds du graphe
$P(V_i Pa_{(V_i)})$	La probabilité de V_i conditionnellement au parent de V_i
$Pa_{(V_i)}$	La probabilité des parents de V_i
$P(V) = \prod_{V_i \in V} P(V_i Pa_{(V_i)})$	Produit des probabilités des V_i dans V selon les parents
$P(X Y)$	Probabilité de X conditionnellement à Y
$X \subset V$	X appartenant à V
$X_t X_1, \dots, X_{t-1}$	X conditionnellement à ses états antérieurs

$\prod_{n=1}^N P(X_{n,t} Pa_{(X_{n,t})})$	Produit des probabilités avec les transitions temporelles
$Pa_{(X_{n,t})}$	Parents de X dans le temps
B_0	B à l'état $T=0$
B_{\rightarrow}	B avec la transition temporelle
$X_{t-n} \cap X_{t+1}$	L'intersection des X dans le temps
L_{kmax}	Latence maximale des K nœuds du réseau
$\sum_{i=0}^{k-1} \max(L_{k_i max})$	Somme le maximum de la latence
LPC	Loi de probabilité conditionnelle
MGP	Modèle Graphique Probabiliste

Abréviations et sigles

VSEPR	Valence Shell Eletronic Pairs Repulsion.
RPECV	Répulsion des Paires Électroniques de la Couche de Valence.
VBCA	Virtual forces Based Clustering Algorithm.
UAV	Unmanned Aerial Vehicule.
MANeT	Mobile Ad-hoc Network.
VANet	Vehicular Ad-Hoc Network.
FANeT	Flying Ad-hoc Network.
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency.
UAVNet	UAV Network.

UCUV	Unmanned Combat Underwater Vehicle
DGA	Direction Générale de l'Armement (FRANCE)
CAGR	Compound Annual Growth Rate
HALE	Haute Altitude, Longue Endurance
MALE	Moyenne Altitude, Longue Endurance
MPCA	Mobility Prediction Clustering Algorithm
RHTA	Receding Horizon Task Assignment
LMPC	Linear Model Predictive Control
RFCSA	Reconfigurable Flight Control System Architecture
APAWSAN	Actor Positioning for Aerial Wireless Sensor and Actor Networks
PSO	Particle Swarm Optimization
QoS	Quality of Service
MLMPGA	Multi-Layout Multi-sub-Population Genetic Algorithm
AODV	Ad hoc On Demand Distance Vector
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
EDSR	Energy-aware Dynamic Source Routing
LEACH	Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy
ELMA	Enhanced Lifetime Maximisation Algorithm
RSS	Received Signal Strength

RBD	Réseau Bayésien Dynamique
Nb	Nombre de communication
Cf	Cadence de fonctionnement
Eb	État de la batterie
REX	Retour d'Expérience
LIP6	Laboratoire d'Informatique de Paris 6

Chapitre 1 - Définitions et Introduction

1.1 Définitions

Il est essentiel de définir certains termes récurrents dans cette thèse, d'autres étant précisés au fil du texte.

1.1.1 Drones

Un drone est un aéronef sans pilote humain à bord, contrôlé à distance ou fonctionnant de manière autonome grâce à des algorithmes et des capteurs embarqués, utilisé pour des applications variées telles que la surveillance, la recherche ou des tâches industrielles et récréatives. Terme générique pour tout véhicule autonome (aérien, terrestre, maritime). Ce terme peut désigner d'autres systèmes autonomes, comme des drones terrestres ou maritimes

1.1.2 UAV

L'UAV (Unmanned Aerial Vehicle) est un appareil volant sans équipage humain à bord, qui fonctionne soit de façon autonome, soit piloté à distance, et qui est développé pour accomplir des tâches précises sans nécessiter la présence physique d'un pilote. Il peut fonctionner de manière totalement autonome grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle et des capteurs embarqués, ou être contrôlé à distance via une station au sol. Généralement intégré dans un système de drones (UAS - Unmanned Aerial System), ensemble comprenant l'UAV, ses équipements de contrôle et de communication, il est utilisé dans divers domaines tels que la défense, l'industrie, la recherche scientifique et

l'observation environnementale, offrant des capacités avancées en matière de surveillance, de cartographie et de collecte de données.

1.1.3 UAS

Un système de drones (UAS - Unmanned Aerial System) est un ensemble complet comprenant un ou plusieurs véhicules aériens sans pilote (UAV - Unmanned Aerial Vehicle), ainsi que les infrastructures de contrôle au sol, les systèmes de communication et les technologies associées, conçu pour coordonner et exécuter des missions autonomes ou téléopérées dans divers domaines d'application

1.1.4 Drone et UAV

Les termes 'drone' et 'UAV' sont souvent confondus, mais diffèrent selon le contexte. 'Drone' désigne généralement tout aéronef sans pilote, y compris des appareils simples comme les drones récréatifs, tandis que 'UAV' se réfère à un véhicule aérien sophistiqué, conçu pour des missions spécifiques dans des contextes scientifiques ou techniques. Pour simplifier, 'drone' sera privilégié dans cette thèse, les deux termes étant parfois interchangeables.

1.2 Introduction

L'industrialisation rapide et l'automatisation croissante accentuent le besoin critique d'infrastructures de réseaux sans fil. Par ailleurs, maintenir en état opérationnel des systèmes à risque, tels que les drones, constitue un enjeu scientifique émergent. Les réseaux ad hoc, flexibles et décentralisés, gagnent en importance, notamment pour des missions de surveillance et de reconnaissance ne nécessitant aucune infrastructure centralisée.

Par ailleurs, les véhicules aériens sans pilote, téléguidés ou autonomes, s'avèrent particulièrement précieux dans des applications militaires et civiles, notamment pour la recherche et la destruction[1], la gestion des incendies[2], la surveillance des frontières[3], le relai des réseaux ad hoc[4][5], le suivi climatique[6][7][8] et la gestion des catastrophes[9][10][11]. En septembre 2024, MarketsandMarkets¹ a estimé une croissance annuelle moyenne (CAGR) de 20% du marché des drones entre 2016 et 2022, atteignant 21,23 milliards de dollars. Ce marché devrait atteindre 48.5 milliards de dollars d'ici 2029[12], [13]. Initialement réservé au domaine militaire, il connaît désormais une libéralisation croissante. De grandes entreprises, telles qu'Amazon, Facebook et GoPro, exploitent déjà des drones pour diverses applications[14].

¹Consulté en septembre 2024

Selon les domaines d'application – récréatifs, commerciaux, industriels ou militaires – et leurs besoins spécifiques, une large gamme de drones, reposant sur diverses technologies, est disponible sur le marché.

Cependant, la plupart de ces technologies sont conçues pour un drone individuel. L'emploi simultané de plusieurs drones introduit des complexités[15] nécessitant des concepts novateurs, en rupture avec les approches classiques adaptées à l'industrie. Cela implique des étapes supplémentaires, augmentant ainsi les coûts. Or, le coût et, la rapidité de développement et de déploiement demeurent des facteurs déterminants.

Outre les contraintes financières, les réseaux ad hoc de drones souffrent d'un écart notable entre les performances requises et les solutions disponibles[16]. Leur caractère critique, lié aux risques pour les personnes et l'environnement selon les missions, impose des exigences élevées en sécurité, fiabilité et maintenabilité. La communauté scientifique explore ainsi de nouvelles approches, notamment l'analyse des processus de dégradation pour détecter les défaillances[17]. Ces études, exploitant les processus stochastiques, visent à améliorer la fiabilité des systèmes critiques[18]. Cependant, les solutions actuelles restent insuffisantes en termes de vitesse, temps de réponse, stabilité, topologie, mobilité des nœuds, communication et robustesse.

Récemment, la recherche académique et industrielle se concentre sur l'emploi d'essaims de drones coopératifs pour accomplir des missions complexes, surmontant ainsi les limites d'un drone unique.

D'où l'émergence des réseaux ad hoc de drones, particulièrement adaptés aux missions complexes grâce à leur précision, leur temps de réponse rapide, leur faible coût et les perspectives qu'ils offrent[15], [19].

Cette tendance s'est renforcée au cours de la dernière décennie avec le développement des réseaux ad hoc mobiles, reconnus pour leur rapport performance/coût, leur mise en œuvre aisée et leur indépendance vis-à-vis d'une infrastructure fixe. Similaires aux réseaux ad hoc mobiles terrestres et aux réseaux ad hoc véhiculaires, les réseaux ad hoc de drones permettent de déployer des réseaux ad hoc pour des tâches complexes, comme la surveillance en temps réel, à moindre coût. Ainsi, cette thèse vise à proposer une optimisation topologique des réseaux ad hoc de drones, fondée sur une version modifiée de la théorie de la répulsion des paires électroniques de la couche de valence, basée sur la répulsion et l'attraction des nœuds autour d'un nœud central. Cette approche répond aux besoins de transmission efficace des données, d'amélioration de la couverture et de prévention des collisions entre nœuds, tout en intégrant une optimisation de la dégradation en ligne via des réseaux bayésiens dynamiques. Après avoir exposé les problématiques, les objectifs scientifiques et l'originalité de ce travail, nous présenterons notre méthodologie, incluant un algorithme basé sur la théorie de la répulsion des paires électroniques. Les résultats préliminaires de nos simulations et nos contributions seront détaillés, avant d'aborder les perspectives envisagées pour cette recherche.

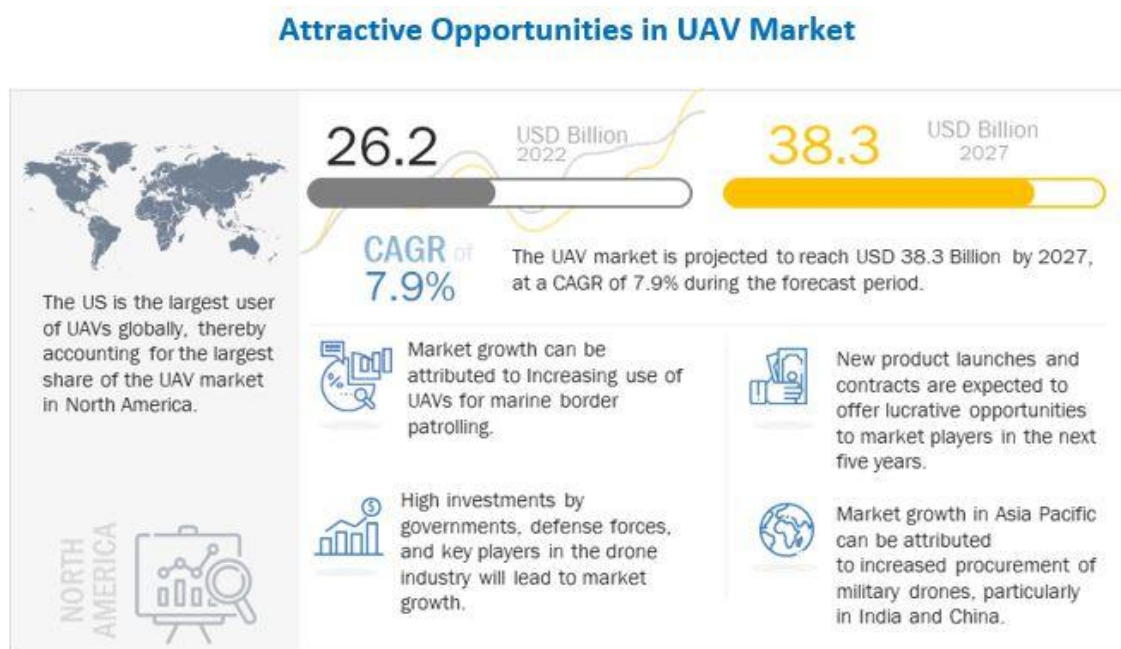


Figure 1 Évolution du marché des drones

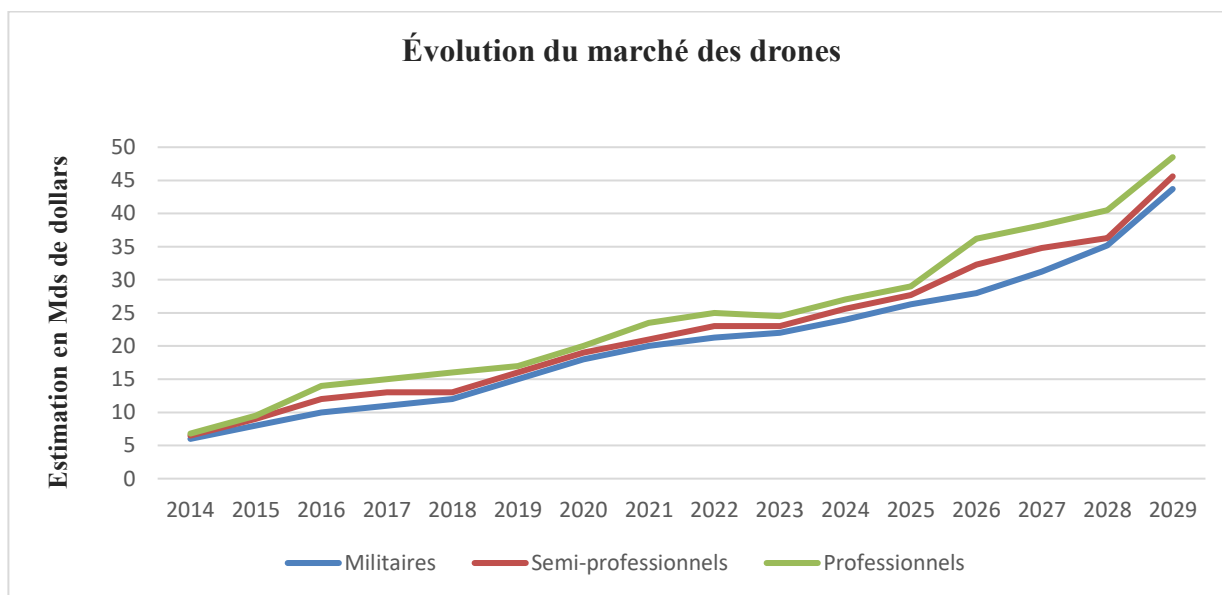


Figure 2 Évolution du marché des drones

1.3 Types des réseaux ad hoc mobiles

1.3.1 MANET

Le réseau mobile ad hoc, ou MANET, constitue une infrastructure de communication sans fil décentralisée où divers appareils mobiles (capteurs, ordinateurs portables, téléphones intelligents, etc.) s'interconnectent spontanément et directement entre eux, créant ainsi un système autoorganisé sans nécessiter de point d'accès central. Les principales caractéristiques sont entre autres la topologie dynamique car les nœuds bougent constamment. Un routage est multi-saut, chaque nœud est capable de relayer des données, enfin une autonomie complète sans infrastructure centrale.

1.3.2 VANET

Un VANET (Vehicular Ad-hoc Network) est une spécialisation de MANET où des véhicules terrestres (voitures, bus, camions), équipés de dispositifs de communication, forment des nœuds mobiles pour échanger des données directement (V2V) ou avec des infrastructures (V2I), afin d'améliorer la sécurité routière et la gestion du trafic. Il est caractérisé par une mobilité rapide mais prévisible. Les exigences en termes de latences sont strictes pour la sécurité routière, enfin la possibilité d'intégration avec des systèmes intelligents de transport.

1.3.3 FANET

Un FANET (Flying Ad-hoc Network) est une spécialisation de MANET, formé par des drones (UAV) en vol, équipés de dispositifs de communication, capables d'échanger des données directement (drone-à-drone) ou avec des stations au sol (GCS), afin de réaliser des missions complexes comme la surveillance ou la cartographie. Il est caractérisé par une

mobilité tridimensionnelle (vol, changement d'altitude), une topologie très dynamique avec une portée plus étendue et des contraintes complexes sur l'énergie, la communication et la stabilité, notamment dues aux variations environnementales (zones urbaines à désertiques) affectant la qualité du signal (ombrage, évanouissement).

1.3.4 Différences entre MANET, VANET, FANET

Les réseaux ad hoc mobiles (MANET) englobent des nœuds variés, comme les appareils mobiles, tandis que les réseaux véhiculaires (VANET) et les réseaux de drones (FANET) en sont des sous-ensembles spécialisés, respectivement pour les véhicules terrestres et les drones, comme illustré dans la Figure 3. Cette thèse se concentre sur l'optimisation des FANET pour des missions complexes.

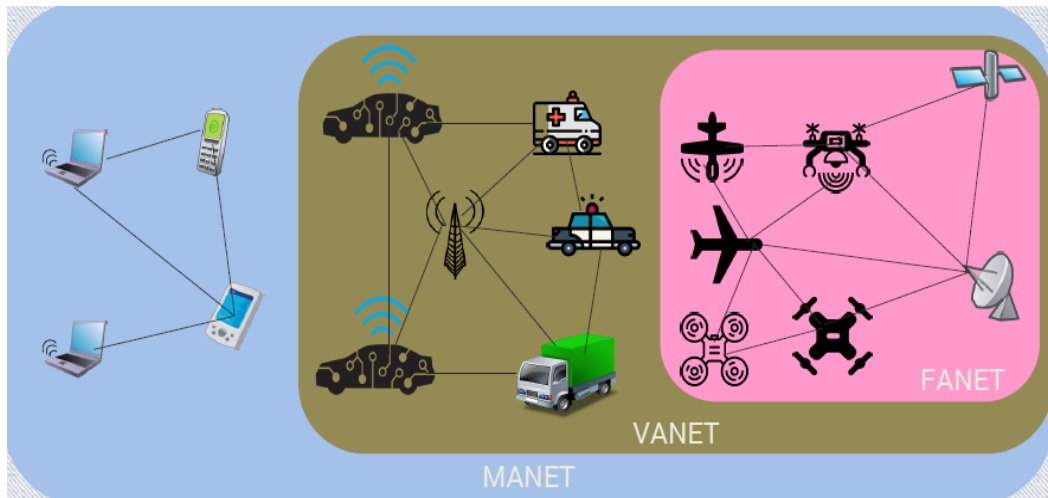


Figure 3 Différence entre MANET, VANET et FANET

1.4 Application des drones

Les drones, utilisés depuis plusieurs décennies, ont vu leurs applications croître, notamment dans le domaine militaire avec des avancées significatives, mais leur usage reste souvent limité à des missions individuelles précises. Les FANET permettent de surmonter cette limitation en coordonnant plusieurs drones pour des missions complexes

Militaire : Dans ce contexte, la compétition est intense entre les grandes entreprises du secteur, telles que Lockheed Martin, Thales, Boeing, Northrop Grumman et Elbit Systems, qui dominent le marché des drones. La majorité des drones opérationnels est actuellement contrôlée par un opérateur depuis un centre de commandement. Cependant les récentes avancées ont permis d'intégrer des systèmes d'intelligence, conférant une autonomie partielle aux drones, comme l'illustrent les modèles Indago² 3 et 4 [20], [21] de Lockheed Martin dédiés à la reconnaissance et la surveillance, ou le système de mini drones de Thalès, Spy'Ranger 330 et Spy'Ranger³ 350 [22]. Ces derniers drones sont conçus pour être coopératifs et capable de voler en formation. Par ailleurs, la collaboration entre Thalès et Schiebel a conduit au développement un drone autonome à voilure tournante [23]. Ce dernier se distingue par sa mise en œuvre rapide et, dans le cadre de la surveillance et du soutien tactique, par son autonomie suffisante pour des mission prolongées, lui permettant de localiser, suivre, fixer et identifier des cibles [24]. C'est dans cette perspective que la Royal Navy a commandé un drone a voilure tournante dans son projet Peregrine surnommé

² Consulté en septembre 2024

³ Consulté en octobre 2024

« Œil dans le Ciel ». Elbit Systems⁴ propose une gamme variée de drones, notamment ceux de la famille Hermes, incluant les modèles MALE (Moyenne Altitude, Longue Endurance) tels que le Hermes 900, sa variante StarLiner, et le Hermes 450 [25] ainsi que la famille Skylark pour des missions tactiques [26] et, le SkyStriker, une munition vagabonde autonome offrant une précision remarquable pour des frappes ciblées [27].

Le développement des drones militaires inclut également des drones sous-marins, tels que l'UCUV (Unmanned Combat Underwater Vehicle) de Naval Group, commandé par la DGA française en 2023 [28], ou le Marlin de Lockheed Martin, qui propose des applications à la fois militaires et civiles, notamment pour la surveillance maritime [29]. D'autres initiatives ont émergé, comme la transformation d'avions de combat en systèmes autonomes, à l'instar du Black Hawk dans le projet Matrix de DARPA et Lockheed Martin [30], ou d'un F-16 converti en drone autonome par Lockheed Martin [31]. Dans le domaine militaire, l'offre de drones est diversifiée, et de nombreuses entreprises se disputent ce marché en pleine expansion. Cependant, les systèmes actuellement disponibles et testés nécessitent encore l'intervention d'un opérateur pour leur contrôle.

Civil : Dans le domaine civil, diverses catégories de drones sont disponibles pour des applications variées. Au Rwanda, Zipline a introduit dès 2016 des drones de livraison transportant des poches de sang vers des zones reculées et difficilement accessibles. Ce système offre un avantage significatif dans les pays où le système de santé est limité, tout en garantissant une réponse rapide aux besoins et en réduisant l'impact environnemental. Initié au Rwanda en 2016, ce projet pilote s'est étendu à d'autres pays, notamment au Ghana en

⁴ Consulté en juin 2024

2019, puis aux États-Unis (Arkansas et Utah), à la Côte d’Ivoire, au Nigeria, au Kenya, ainsi qu’au Japon en 2022. Les drones de Zipline interviennent dans plusieurs secteurs, principalement dans la livraison de produits médicaux, de denrées alimentaires et de solutions agricoles.

Dans le domaine agricole, les drones sont employés pour l’épandage, comme les modèles DJI Agras T16 et T30 [32], ou le XAG P100 conçu pour la pulvérisation de précision [33]. Dans ce segment il y’a une variété des drones selon les besoins. Ce secteur bénéficie d’une diversité de drones adaptés aux besoins spécifiques. Dans le domaine du sauvetage, les drones ont démontré leur utilité lors de catastrophes, notamment lors du séisme au Népal⁵ en 2015 [34], du typhon aux Philippines en 2013 [35], ou des tremblements de terre au Maroc en 2023 [36] et au Canada⁶ près de la Baie James en 2023 [37].

De nombreux secteurs exploitent les drones pour des applications variées. Ils sont notamment utilisés dans la livraison, comme par Amazon avec son service Prime Air [38], ou dans des projets impliquant des entreprises comme GoPro pour la capture de vidéos. Par ailleurs, les drones sont prisés pour des usages récréatifs, tels que la photographie et la vidéographie aériennes.

⁵ Consulté en juillet 2024

⁶ Consulté en juillet 2024



Figure 4 Plateformes à voilure fixe



Figure 5 Plateforme à rotor



Figure 6 Plateforme à voilures tournantes

Les plateformes de drones se distinguent selon la configuration de leurs voilures. Les drones à voilures fixes, qui nécessitent généralement une rampe ou une catapulte pour le lancement, sont adaptés aux missions de longue distance, telles que les opérations militaires. Ils sont également utilisés par Zipline au Rwanda pour la livraison de poches de sang dans des zones reculées et difficilement accessibles.

Les plateformes à rotors, quant à elles, sont privilégiées pour des missions à courte distance et à basse altitude. Elles trouvent une application fréquente dans le domaine civil et récréatif, notamment pour la capture de photos et de vidéos aériennes. Le nombre de rotors peut varier en fonction des modèles. Dans le domaine militaire, ces drones à rotors servent principalement à des missions d'appui tactique de courte durée, mais ils ne sont pas conçus pour des trajets de longue distance. Par ailleurs, des plateformes hybrides combinant voilures fixes et rotors existent, comme les drones tactiques d'Elbit Systems, tels que le Skylark pour la surveillance [26] ou le SkyStriker [27].

Une autre catégorie notable est celle des plateformes à voilures tournantes, comme les drones développés par Thales et Schiebel dans le cadre du projet Peregrine, surnommé «

Œil dans le Ciel ». Ce système, conçu pour la Royal Navy, offre des capacités de protection aux navires en assurant une surveillance aérienne avancée [39]. Il s'agit d'un hélicoptère sans pilote capable d'un décollage rapide, doté d'une autonomie suffisante pour effectuer des missions de longue distance, et apte à localiser, identifier et suivre des cibles. Le choix des plateformes disponibles dépend des objectifs et des exigences de la mission. Les drones à voilures fixes, par exemple, sont généralement adaptés aux missions de longue et moyenne distance, ainsi qu'aux opérations à haute et moyenne altitude. Ils sont fréquemment employés dans le domaine militaire, mais également pour des applications civiles, telles que la livraison de produits médicaux par Zipline. Ces différentes configurations de drones, qu'il s'agisse de voilures fixes, tournantes ou hybrides, soulignent le potentiel des FANET pour coordonner des flottes hétérogènes, optimisant ainsi leur positionnement et leur efficacité opérationnelle, notamment via des approches comme celle proposée dans cette thèse, basée sur une théorie modifiée de la répulsion des paires électroniques

Chapitre 2 - Éléments constitutifs et la problématique

Ce chapitre détaillera dans un premier temps, les objectifs recherchés tout au long de ce travail, ensuite une présentation détaillée, du cadre général dans lequel s'inscrit la thèse et enfin les avantages détaillés des méthodes mises en œuvre pour la réalisation de la thèse.

2.1 Les objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir un réseau FANET entièrement autonome et optimisé, capable de fonctionner de manière efficace dans des environnements complexes. À cette fin, notre travail a été structuré en deux axes majeurs. Le premier axe de recherche s'est concentré sur l'étude de la topologie du réseau, un aspect fondamental pour les FANET. En effet, ces réseaux, en plus de devoir composer avec les contraintes inhérentes aux environnements de survol (tels que les variations climatiques, les obstacles physiques ou les interférences électromagnétiques) et la forte mobilité des nœuds, héritent des limitations classiques des réseaux ad hoc mobiles, notamment en termes de connectivité, de latence et de gestion de la dynamique des nœuds. Le second axe est dédié à l'optimisation du réseau à travers une modélisation de la dégradation de notre système, visant à renforcer sa fiabilité. Dans cette partie, nous analysons une stratégie pour assurer la robustesse du réseau, en tenant compte de la topologie choisie, qui repose sur une organisation en grappes. Une grappe est constituée par un drone central ou nœud principal, autour duquel les drones secondaires gravitent. Une grappe est l'élément de base du système. Elle est aussi parfois appelée cluster au long de cette thèse. Le système est constitué de plusieurs grappes. Ces grappes, fortement centralisées, sont composées de plusieurs nœuds dits « secondaires », coordonnés par un

nœud central désigné comme le nœud principal. Dans une telle architecture, la fiabilité du réseau dépend principalement de la performance et de la résilience du nœud central. Par conséquent, notre travail d'optimisation se focalise sur ce nœud central, en étudiant des stratégies de maintenance industrielle pour garantir la sûreté de fonctionnement du réseau global. Cette approche d'optimisation s'appuie sur une méthode innovante, basée sur une adaptation de la théorie de la répulsion des paires électroniques, afin de minimiser les risques de défaillance et d'améliorer la coordination au sein des grappes, contribuant ainsi à une meilleure efficacité opérationnelle des FANET.

Dans le cadre de ce travail, nous avons validé à la fois la topologie proposée et les stratégies d'optimisation du réseau FANET à travers des simulations, constituant une approche méthodologique clé pour évaluer la performance et la robustesse de notre modèle. Cette décision s'est imposée en l'absence de prototypage physique, une limitation principalement imputable à des contraintes de ressources, notamment un manque de financement et d'infrastructures matérielles adaptées pour la mise en œuvre expérimentale. Dans la partie dédiée à l'optimisation, nous avons adopté une approche probabiliste basée sur des probabilités a priori, une méthode justifiée par l'absence d'une base de données de retour d'expérience, communément désignée par l'acronyme REX (Retour d'Expérience), qui aurait permis de s'appuyer sur des données empiriques issues de déploiements réels. Ces probabilités a priori ont été établies en nous fondant sur des hypothèses théoriques dérivées de la littérature existante et des caractéristiques spécifiques des FANET, telles que la mobilité élevée des nœuds et les contraintes environnementales. Cette stratégie probabiliste nous a permis de modéliser la dégradation du système et d'anticiper les points de défaillance potentiels, tout en posant les bases pour une future validation expérimentale lorsque les

ressources le permettront. Par ailleurs, cette méthodologie s'inscrit dans une approche plus large d'optimisation, qui tire parti d'une adaptation de la théorie de la répulsion des paires électroniques, une méthode innovante développée dans cette thèse pour améliorer la coordination des nœuds au sein des grappes et minimiser les risques d'instabilité dans le réseau FANET.

2.2 Cadre général

Le concept de véhicule aérien sans pilote n'est pas récent. Il naquit durant la première guerre mondiale, à l'exemple Kettering Bug [40] par Charles Franklin Kettering et produit par la compagnie Dayton-Wright. Ces prototypes sont téléguidés par télégraphie sans fil. Ce sont des torpilles aériennes qui sont capable d'atteindre des cibles à environ 120 km de leur base. Le Kettering Bug dispose aussi d'un gyroscope. La distance est déduite de nombre tours-moteurs nécessaires. D'autres projets dans le même ordre d'idée ont vu le jour au Royaume-Uni comme Aerial-Target de Archibald Low [41], aux États-Unis avec le projet Hewit-Sperry automatic airplane d'Elmer Ambrose Sperry, Lawrence Sperry et Peter Cooper Hewit [42], ou encore en France avec le projet Voisin de Max Boucher [43]. Tous ces projets ne sont restés qu'à l'étape de test, mais le vrai départ commence à la guerre de Corée et celle de Vietnam [44]. Durant cette période de guerre froide, les Américains ont développé de façon confidentielle pour prouver leur supériorité. Lors de ces conflits, les avions servaient à larguer des tracts. Mais le vrai essor commence en Israël, avec le transfert de technologie. On y assiste au développement concret de drones tactiques.

La classification des drones selon l'OTAN se répartit en trois catégories en fonction de leur poids, moins de 150 Kg sont de mini drones, puis entre 150 et 600 Kg sont des drones tactiques et enfin les plus de 600 Kg [45]. Dans cette dernière catégorie nous avons aussi

deux classes : HALE (Haute Altitude, Longue Endurance) qui évoluent à 60000 pieds, nous pouvons citer RQ-4 Global Hawk de Northrop Grumman. Il est utilisé par l'armée américaine. Ensuite nous avons les MALE (Moyenne Altitude, Longue Endurance) comme les Predators, Reaper coté américains ou encore Harfang français et les versions de TAI Anka turcs. Nous avons ici introduit que les versions militaires de drones, mais bien évidemment il existe différents domaines d'application. Suivant les domaines d'application qui sont pour la plupart du temps d'ordre récréatif, commercial, industriel ou militaire et les besoins recherchés une grande variété de drones est proposée sur le marché. Ceux-ci existent sous diverses technologies.

Dans ce contexte, nous avons abordé l'évolution des drones, depuis leur utilisation individuelle jusqu'à l'émergence des FANET, qui marquent une transition vers des systèmes collaboratifs. Un drone, en tant qu'aéronef sans pilote, intègre des centaines de capteurs (ex. : GPS, IMU, caméras) et des systèmes complexes qui nécessitent une maintenance rigoureuse pour garantir leur bon fonctionnement et l'exécution des tâches prévues.

2.3 Limites technologiques entre un drone et un FANET

Dans le domaine des drones, certaines technologies sont spécifiquement conçues ou optimisées pour une utilisation individuelle, où un seul appareil fonctionne de manière autonome ou sous contrôle direct d'un opérateur. Toutefois, ces solutions deviennent souvent inefficaces, limitées, voire inadaptées lorsqu'elles sont transposées à des scénarios impliquant plusieurs drones coopérants au sein d'un réseau. Cela s'explique par les contraintes supplémentaires liées à la coordination, à la synchronisation des actions, à la gestion des interférences radio, ainsi qu'à la complexité accrue des interactions inter-drones.

2.4 Vers des solutions adaptées aux contraintes des FANET

Face aux limites des technologies initialement conçues pour des drones isolés, l'émergence des réseaux de drones coopératifs (FANET – *Flying Ad Hoc Networks*) a nécessité le développement de solutions dédiées, capables de répondre aux contraintes inhérentes à ce type d'architecture. Contrairement aux réseaux mobiles terrestres (MANET, VANET), les FANET présentent des défis spécifiques liés à la **mobilité 3D rapide**, à la **topologie fortement dynamique**, à la **latence critique**, ainsi qu'à la **consommation énergétique limitée** des plateformes aériennes.

Ce qui suit propose une analyse comparative de ces technologies, illustrée par des exemples concrets, afin de mettre en évidence leurs limites en contexte multi-drones.

2.4.1 *Communication en réseau maillé adaptatif*

L'une des premières exigences pour un FANET est la mise en place de protocoles de communication dynamiques capables de s'adapter aux variations topologiques fréquentes, inhérentes à la mobilité élevée des drones. Contrairement aux drones individuels, qui peuvent se contenter de canaux de communication simples comme une liaison radio point-à-point, les essaims nécessitent des solutions robustes pour gérer les interférences et maintenir une connectivité continue. Des protocoles tels que OLSR (Optimized Link State Routing) et AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) ont été adaptés aux contextes aériens, en intégrant des couches MAC spécifiques comme TDMA (Time Division Multiple Access) ou une version modifiée de CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Ces mécanismes permettent de minimiser les collisions de paquets et d'assurer une résilience accrue des liaisons inter-drones, même dans des environnements perturbés par

des obstacles ou des interférences électromagnétiques. Par exemple, dans une mission de surveillance maritime, un réseau maillé adaptatif combinant OLSR et TDMA peut maintenir la connectivité entre les drones malgré les perturbations dues aux conditions météorologiques ou aux interférences marines. En parallèle, des solutions récentes exploitent des réseaux maillés hybrides, intégrant des technologies comme LTE/5G pour les communications à longue portée, Wi-Fi pour les échanges locaux à haute vitesse, et RF (radiofréquence) pour les environnements sans couverture cellulaire. Ces réseaux hybrides améliorent la robustesse des communications en permettant une commutation dynamique entre les technologies en fonction des conditions opérationnelles. Dans notre topologie en grappes, ces protocoles de communication adaptatifs sont essentiels pour assurer une liaison fiable entre le nœud central et les nœuds secondaires, tout en soutenant l'optimisation spatiale des positions via l'approche VSEPR, qui repose sur une coordination précise des nœuds.

2.4.2 Stratégies de coordination distribuée

Une fois la communication établie, la coordination entre les drones devient un enjeu majeur. Dans un essaim, une approche centralisée, comme celle utilisée dans notre topologie en grappes, peut rapidement devenir un goulot d'étranglement, notamment en cas de surcharge du nœud central ou de défaillance de celui-ci. Pour pallier cette limitation, de nombreuses études explorent des stratégies distribuées ou hybrides, où chaque drone prend des décisions locales tout en coopérant avec ses voisins. Ces approches s'inspirent de la robotique collective et des comportements bio-inspirés, tels que les algorithmes de Boids [46], [47], qui reposent sur des règles simples de cohésion, séparation et alignement pour maintenir une formation en vol (ex. : formation en V pour réduire la consommation énergétique). Les comportements stigmergies, inspirés des fourmis, permettent également

aux drones de partager des informations indirectement via l'environnement, par exemple en marquant des zones explorées pour éviter les redondances. Ces techniques sont particulièrement utiles pour des tâches comme l'évitement d'obstacles coopératif ou le partage de zones d'exploration lors de missions de recherche et sauvetage, où un essaim de drones peut couvrir une zone sinistrée tout en évitant les collisions. Dans notre topologie, une approche hybride pourrait être envisagée, où le nœud central délègue certaines décisions aux nœuds secondaires en cas de surcharge, tandis que l'optimisation VSEPR assure une répartition spatiale optimale des drones pour minimiser les interférences et maximiser la couverture. Ces stratégies de coordination s'appuient également sur le partage des données, un aspect clé abordé dans la fusion de données coopérative.

2.4.3 *Fusion des données coopérative*

La coordination efficace d'un essaim de drones repose sur une perception partagée de l'environnement, rendue possible par la fusion multi-source des données capteurs. Contrairement à un drone individuel, où le traitement local des données (ex. : LIDAR, images) est suffisant, un essaim nécessite une approche collaborative pour éviter la redondance et optimiser l'analyse. Des architectures distribuées permettent aux drones de partager leurs données de navigation, de détection ou de cartographie, afin de construire une compréhension globale de l'espace. Par exemple, le SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [48] collaboratif permet à un essaim de drones de générer une carte 3D partagée d'une zone sinistrée lors d'une mission de recherche et sauvetage, en combinant les données LIDAR et visuelles de chaque nœud. Des techniques comme la perception distribuée, souvent basées sur des filtres de Kalman étendus, intègrent les données de position et d'orientation pour améliorer la précision de la localisation collective. Le mapping coopératif, quant à lui,

permet de fusionner les cartes partielles générées par chaque drone pour une couverture complète, réduisant ainsi les zones non explorées. Dans notre topologie en grappes, la fusion de données joue un rôle clé : le nœud central peut centraliser les informations pour une prise de décision optimisée, tandis que les nœuds secondaires partagent leurs données pour alimenter cette analyse globale, en cohérence avec l'optimisation spatiale assurée par VSEPR. Cette fusion de données est également essentielle pour la planification de mission en temps réel, qui nécessite une vision actualisée de l'environnement.

2.4.4 Planification de mission en temps réel

Dans des environnements dynamiques et imprévisibles, l'adaptation des trajectoires en temps réel est cruciale pour garantir l'efficacité des FANET. Contrairement à un drone individuel, qui peut suivre une trajectoire prédéfinie sans ajustement, un essaim doit s'adapter aux changements de l'environnement, aux pannes, ou aux variations des objectifs de la mission. Des systèmes de planification en ligne, reposant sur des algorithmes d'optimisation multi-objectifs, sont intégrés pour répondre à ces besoins. Par exemple, l'algorithme A* [49] permet de calculer des trajectoires optimales en tenant compte des obstacles, tandis que RRT (Rapidly-exploring Random Tree Star) [50] explore rapidement l'espace des solutions pour générer des chemins adaptés à des environnements complexes. Les algorithmes évolutionnaires, comme PSO (Particle Swarm Optimization) [51], sont utilisés pour optimiser la répartition des tâches et la couverture spatiale, par exemple lors d'une mission de surveillance agricole où un essaim doit ajuster ses trajectoires pour couvrir une zone après la détection d'un obstacle imprévu. Ces systèmes permettent également une gestion autonome des pannes (re-routing) : si un drone tombe en panne, les autres ajustent leurs trajectoires pour compenser la perte. Dans notre topologie en grappes, la planification en

temps réel est essentielle pour permettre au nœud central de redistribuer les tâches en cas de défaillance d'un nœud secondaire, tout en s'appuyant sur les positions optimisées par VSEPR pour minimiser les interférences. Cette planification s'accompagne d'une surveillance proactive de l'état du réseau, nécessaire pour anticiper les défaillances potentielles.

2.4.5 Maintenance prédictive et surveillance l'état du réseau

Un essaim de drones nécessite une surveillance constante de l'état matériel et logiciel de chaque nœud pour garantir la fiabilité du réseau, un aspect particulièrement critique dans notre topologie en grappes où le nœud central joue un rôle clé. Des approches de maintenance prédictive, basées sur l'analyse en temps réel des télémetries, permettent d'anticiper les défaillances potentielles. Par exemple, la surveillance des vibrations des moteurs, de la température des batteries, ou de la consommation énergétique peut révéler des signes d'usure ou de dysfonctionnement. Dans une mission de livraison médicale, cette analyse peut détecter une usure des moteurs et planifier une maintenance avant une défaillance, évitant ainsi une interruption de service. Ces données sont traitées par des systèmes d'intelligence artificielle embarquée, tels que des réseaux de neurones ou des systèmes experts, qui prédisent les risques et proposent des plans de maintenance proactifs. En cas de détection d'une anomalie, le système peut également réaffecter dynamiquement les missions pour minimiser l'impact sur l'opération globale. Dans notre topologie, la maintenance prédictive est cruciale pour le nœud central, dont la défaillance pourrait interrompre la coordination des nœuds secondaires, et s'intègre à l'optimisation VSEPR en assurant que les positions des drones restent optimales même en cas de maintenance. Cette surveillance proactive s'accompagne de mécanismes de tolérance aux pannes pour garantir la continuité des opérations.

Ces approches, allant de la communication adaptative à la tolérance aux pannes, permettent de surmonter les limitations des technologies unitaires et de répondre aux exigences des FANET. Dans le cadre de notre travail, elles s'intègrent à notre topologie en grappes et à notre méthode d'optimisation basée sur VSEPR, contribuant à une coordination efficace, une fiabilité accrue, et une résilience globale du réseau. Ces solutions posent les bases pour des FANET entièrement autonomes, capables de fonctionner de manière optimale dans des environnements complexes.

2.4.6 Tolérance aux pannes et reconfiguration

Dans un environnement FANET, la perte d'un drone ne doit pas entraîner l'échec global de la mission, un enjeu particulièrement important dans notre topologie en grappes où la défaillance du nœud central pourrait compromettre l'ensemble du réseau. Des mécanismes de tolérance aux pannes, tels que la redondance, la migration de tâches, et la réorganisation automatique du réseau, sont mis en place pour assurer la continuité opérationnelle. Par exemple, dans une mission de surveillance militaire, si un drone est perdu, les autres nœuds peuvent redistribuer les rôles critiques grâce à des algorithmes de consensus distribué, permettant au réseau de continuer à couvrir la zone cible. La migration de tâches permet de transférer les responsabilités d'un drone défaillant à un autre, tandis que la réorganisation automatique ajuste la topologie du réseau pour maintenir la connectivité. Dans notre topologie, ces mécanismes permettent aux nœuds secondaires de prendre le relais en cas de défaillance du nœud central, tandis que l'optimisation VSEPR garantit une répartition spatiale adaptée après la reconfiguration. Ces solutions renforcent la résilience globale du réseau, un objectif clé de notre travail.

2.5 Les différents types de maintenance industrielle

L'importance de la maintenance industrielle dans les systèmes complexes est aujourd'hui largement reconnue, en particulier dans des contextes où la fiabilité des équipements est cruciale pour éviter des catastrophes majeures. À l'aube de l'industrialisation, la maintenance se limitait principalement à des interventions correctives, c'est-à-dire à des réparations effectuées après une défaillance, souvent avec des conséquences dramatiques. L'histoire nous fournit des exemples éloquentes de cette approche réactive, comme le naufrage du Titanic en 1912, où des défaillances structurelles et un manque d'inspection préalable ont contribué à la tragédie, ou encore l'accident de la navette spatiale Challenger en 1986, survenu seulement 73 secondes après son décollage. Ce dernier cas illustre de manière frappante les limites d'une maintenance purement corrective. Selon le rapport de la commission Rogers, l'accident de Challenger a été causé par deux facteurs principaux : une défaillance technique, liée à l'incapacité des joints toriques du propulseur d'appoint droit à maintenir leur élasticité et leur étanchéité à basses températures, et une erreur humaine d'ordre managérial, marquée par une sous-estimation des risques [52]. Les joints toriques, conçus pour assurer l'étanchéité des segments du booster, ont perdu leur résilience sous l'effet des températures inhabituellement basses enregistrées le jour du lancement (environ -1°C, bien en deçà des spécifications de conception). Cette défaillance a entraîné une fuite de gaz chauds, qui ont endommagé le réservoir externe, provoquant l'explosion de la navette et la perte de l'équipage. Cet accident met en lumière l'importance d'une maintenance industrielle plus proactive, qui aurait pu inclure des tests rigoureux des joints dans des conditions extrêmes ou leur remplacement par des matériaux plus résistants, évitant ainsi une catastrophe.

La maintenance industrielle regroupe plusieurs approches, chacune répondant à des besoins spécifiques en termes de fiabilité et de coûts.

La maintenance corrective, comme mentionné précédemment, intervient après une défaillance, ce qui peut entraîner des interruptions coûteuses et des risques élevés. La *maintenance préventive* systématique, quant à elle, repose sur des interventions planifiées à intervalles fixes, indépendamment de l'état réel des équipements, ce qui peut réduire les risques de défaillance mais augmente les coûts en raison de remplacements ou d'arrêts inutiles.

Une approche plus avancée, *la maintenance conditionnelle*, s'appuie sur la surveillance de l'état des équipements (via des capteurs mesurant vibrations, température, etc.) pour intervenir uniquement lorsque des signes de dégradation sont détectés.

Enfin, *la maintenance prédictive*, qui s'inscrit dans une logique proactive, utilise des outils d'analyse de données et des modèles prédictifs (souvent basés sur l'intelligence artificielle) pour anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent, optimisant ainsi les interventions et réduisant les coûts. Ces différentes approches ont conduit à l'émergence de disciplines académiques et industrielles telles que la fiabilité, la sûreté de fonctionnement, et la maintenance basée sur la fiabilité (Reliability-Centered Maintenance, RCM). La RCM, par exemple, repose sur une analyse systématique des modes de défaillance et de leurs effets (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA) pour identifier les composants critiques et définir des stratégies d'intervention adaptées, améliorant la disponibilité des systèmes tout en maîtrisant les coûts.

Dans le cadre de notre travail sur les FANET, nous avons choisi de nous concentrer sur la maintenance prédictive, en raison de son potentiel à anticiper les défaillances dans un

contexte où la fiabilité est cruciale, notamment dans notre topologie en grappes, où le nœud central joue un rôle critique dans la coordination des nœuds secondaires. Une défaillance de ce nœud, par exemple due à une usure non détectée de ses composants (batterie, capteurs, ou systèmes de communication), pourrait entraîner une perte de connectivité et compromettre l'ensemble du réseau. La maintenance prédictive, en s'appuyant sur l'analyse en temps réel des télémétries (vibrations, température, consommation énergétique) et des modèles d'apprentissage automatique, permet de détecter les signes avant-coureurs de défaillance et de planifier des interventions ciblées. Par exemple, un drone dont la batterie montre des signes de surchauffe pourrait être retiré temporairement de la mission, tandis que les autres nœuds ajustent leurs positions pour maintenir la couverture, une reconfiguration rendue possible par les mécanismes de tolérance aux pannes. Cette approche s'intègre à l'optimisation spatiale des nœuds via l'approche VSEPR, qui assure une répartition optimale des drones pour minimiser les interférences et maximiser l'efficacité opérationnelle. Ainsi, la maintenance prédictive, en tant que composante clé de la maintenance industrielle, contribue à renforcer la résilience et la fiabilité des FANET, tout en s'inscrivant dans une logique d'optimisation globale des coûts et des performances.

Étudier la fiabilité d'un système ou diagnostiquer ses défaillances revient à analyser le mode de fonctionnement dans lequel ce système se trouve, afin d'identifier les points de vulnérabilité et d'anticiper les risques. Dans les premières approches de diagnostic des défaillances, les méthodes employées s'appuyaient souvent sur la redondance matérielle, une technique très répandue dans des secteurs où la sûreté de fonctionnement est cruciale, tels que l'aéronautique ou le nucléaire, où la sécurité des personnes et de l'environnement est en jeu. La redondance matérielle consiste à dupliquer les composants critiques d'un système

pour garantir sa continuité de fonctionnement en cas de défaillance d'un élément. Par exemple, dans un réacteur nucléaire, les systèmes de refroidissement peuvent être redondants pour éviter une surchauffe en cas de panne. Cependant, cette approche présente des limites majeures, notamment en termes de coûts, car la multiplication des éléments entraîne une augmentation des dépenses liées à l'acquisition, l'installation, et la maintenance des équipements redondants. Avec le développement de calculateurs plus puissants et l'émergence de nouvelles technologies, il est désormais possible de réduire, voire de supprimer, la redondance matérielle au profit de méthodes plus intelligentes, telles que l'automatique et l'intelligence artificielle. Deux grandes approches de diagnostic des défaillances se distinguent aujourd'hui. L'approche quantitative, qui repose sur l'utilisation de modèles analytiques tels que les observateurs, les espaces de parité, ou l'estimation des paramètres, nécessite un modèle mathématique précis des phénomènes physiques gouvernant le système [53], [54] la qualité des résultats dépend donc directement de la précision du modèle, ce qui peut poser un problème pour des systèmes complexes où un modèle parfaitement représentatif est difficile à obtenir. En revanche, l'approche qualitative s'affranchit des modèles analytiques et s'appuie principalement sur l'intelligence artificielle pour exploiter les données disponibles et effectuer un apprentissage [55]. Cette approche est particulièrement adaptée aux systèmes complexes pour lesquels des données expertes sont accessibles, permettant l'utilisation de modèles graphiques comme les réseaux bayésiens, qui prennent en compte les incertitudes inhérentes aux systèmes dynamiques.

Dans le cadre de notre travail sur les FANET, nous avons choisi de nous concentrer sur la maintenance prédictive, en raison de son potentiel à anticiper les défaillances dans un contexte où la fiabilité est cruciale, notamment dans notre topologie en grappes, où le nœud

central joue un rôle critique dans la coordination des nœuds secondaires. Une défaillance de ce nœud, par exemple due à une usure non détectée de ses composants (batterie, capteurs, ou systèmes de communication), pourrait entraîner une perte de connectivité et compromettre l'ensemble du réseau. La maintenance prédictive, en s'appuyant sur l'analyse en temps réel des télémetries (vibrations, température, consommation énergétique) et des modèles d'apprentissage automatique, permet de détecter les signes avant-coureurs de défaillance et de planifier des interventions ciblées. Par exemple, un drone dont la batterie montre des signes de surchauffe pourrait être retiré temporairement de la mission, tandis que les autres nœuds ajustent leurs positions pour maintenir la couverture, une reconfiguration rendue possible par les mécanismes de tolérance aux pannes. Cette approche s'intègre à l'optimisation spatiale des nœuds via l'approche VSEPR, qui assure une répartition optimale des drones pour minimiser les interférences et maximiser l'efficacité opérationnelle. Pour aller plus loin dans l'analyse de la fiabilité, notre travail s'appuie également sur des méthodes de diagnostic des défaillances adaptées aux systèmes complexes comme les FANET. Compte tenu des limitations des approches quantitatives, qui nécessitent des modèles précis souvent difficiles à établir pour un essaim de drones en mouvement, nous privilégions une approche qualitative basée sur l'intelligence artificielle. Plus précisément, nous utilisons des réseaux bayésiens dynamiques pour modéliser les défaillances potentielles des nœuds centraux, en tenant compte des incertitudes liées à des facteurs tels que la vitesse des drones, le nombre de nœuds périphériques, l'environnement, et la cadence de communication.

Ce travail s'articule ainsi autour de deux axes principaux. Le premier axe porte sur la topologie d'un FANET, qui repose sur une adaptation de la théorie de la répulsion des paires électroniques (VSEPR). Cette théorie a permis de développer un algorithme, le VBCA

(Virtual Forces Based Clustering Algorithm), qui structure le réseau en une topologie hiérarchisée et clustérisée. Dans cette architecture, des drones centraux (nœuds principaux) contrôlent, guident, et coordonnent les drones périphériques (nœuds secondaires), tout en assurant la transmission des données vers les stations de base. Le second axe est consacré à l'étude de la fiabilité des nœuds centraux, qui constituent le cœur de chaque cluster. Un cluster, considéré comme un système complexe, est influencé par de multiples paramètres, tels que la vitesse des drones, le nombre de nœuds périphériques, les conditions environnementales, et la cadence de communication. La performance et la résilience du cluster dépendent fortement de la capacité énergétique du nœud central et de sa tolérance aux pannes. Pour garantir la robustesse du réseau, il est essentiel d'étudier le pronostic des défaillances de ces nœuds centraux et de mettre en place des stratégies pour y remédier de manière proactive. À cette fin, nous utilisons un modèle graphique, le réseau bayésien dynamique, pour modéliser et anticiper les défaillances, en prenant en compte les incertitudes inhérentes à un système aussi dynamique qu'un FANET. Ainsi, la maintenance prédictive, combinée à des outils de diagnostic comme les réseaux bayésiens dynamiques, contribue à renforcer la résilience et la fiabilité des FANET, tout en s'inscrivant dans une logique d'optimisation globale des coûts et des performances.

2.6 Présentation de la recherche

La topologie et la géométrie d'un réseau sont des paramètres fondamentaux qui influencent directement les performances des réseaux ad hoc, notamment dans le contexte des FANET, où la couverture spatiale, la connectivité, et la qualité de transmission des données sont essentielles. Une topologie mal conçue peut entraîner des pertes de connectivité, une couverture inefficace de la zone de survol, ou une surcharge des nœuds,

compromettant ainsi l'efficacité de la mission. L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle solution de topologie pour les FANET, basée sur une adaptation de la théorie de la répulsion des paires électroniques (VSEPR), afin d'optimiser la transmission des données et d'assurer une couverture spatiale maximale en trois dimensions (3D). Cette approche s'inscrit dans une logique d'amélioration des performances globales du réseau, en tenant compte des contraintes spécifiques des FANET, telles que la forte mobilité des nœuds, les interférences, et les variations environnementales. Plusieurs travaux ont précédemment exploré l'application de la théorie VSEPR pour optimiser la couverture spatiale dans des réseaux de drones. Par exemple, l'étude présentée dans [56] propose un algorithme basé sur la théorie VSEPR, où un nœud central est positionné au cœur de la structure, entouré de nœuds périphériques disposés selon une géométrie inspirée des forces de répulsion électronique. Cette approche a permis d'optimiser la couverture de la zone de survol, mais elle se limite à une analyse géométrique et ne prend pas en compte des aspects dynamiques comme la mobilité des nœuds ou la gestion des interférences. Une avancée significative a été réalisée dans [57] qui généralise l'application de la théorie VSEPR en introduisant plusieurs nœuds centraux, chacun coordonnant un ensemble de nœuds périphériques. Cette étude a démontré une amélioration notable de la couverture spatiale, avec une augmentation de 50% par rapport aux techniques traditionnelles, grâce à une répartition plus dense et équilibrée des nœuds. Cependant, ces travaux se concentrent principalement sur l'optimisation statique de la couverture et ne traitent pas des défis liés à la dynamique des FANET, tels que la reconfiguration en temps réel ou la tolérance aux pannes.

Un avantage clé de la théorie VSEPR réside dans sa capacité à modéliser la couverture spatiale directement en 3D, ce qui est particulièrement adapté aux FANET, où les drones

évoluent dans un espace tridimensionnel. En comparaison, d'autres approches, comme celles présentées dans [58], [59] adoptent une modélisation initiale en deux dimensions (2D), qu'elles transforment ensuite en 3D à l'aide de projections sphériques ou circulaires. Cette méthode, bien que fonctionnelle, introduit une complexité computationnelle significative, car la transformation d'une couverture 2D en 3D est un problème NP-difficile, nécessitant une puissance de calcul importante et des approximations qui peuvent réduire la précision de la couverture. En revanche, l'approche VSEPR permet une optimisation native en 3D, évitant ces limitations et offrant une solution plus efficace pour le déploiement des FANET. Au-delà de la géométrie et de la couverture spatiale, la théorie VSEPR offre des perspectives prometteuses pour d'autres aspects des FANET, tels que la minimisation des interférences, l'optimisation énergétique, et la reconfiguration dynamique des nœuds en cas de panne, des aspects que notre travail cherche à approfondir.

Dans notre recherche, nous exploitons les potentialités de la théorie VSEPR pour concevoir une topologie en grappes, où chaque grappe est centrée autour d'un nœud principal (drone central) qui coordonne un ensemble de nœuds secondaires (drones périphériques). Cette architecture hiérarchique, optimisée par l'algorithme VBCA (Virtual Forces Based Clustering Algorithm), s'appuie sur les principes de répulsion de la théorie VSEPR pour positionner les nœuds de manière à maximiser la couverture 3D tout en minimisant les interférences. Par rapport aux travaux précédents, notre approche va au-delà de l'optimisation statique de la couverture en intégrant des mécanismes de reconfiguration dynamique, permettant au réseau de s'adapter en temps réel aux changements environnementaux ou aux défaillances de nœuds. Cette contribution constitue un pas en avant significatif pour le

déploiement de FANET dans des scénarios complexes, tels que la surveillance de zones sinistrées ou la livraison médicale en milieu urbain

À notre connaissance, aucune étude n’a encore exploré de manière approfondie l’impact de la théorie VSEPR sur les mécanismes de communication dans les FANET, bien que cette théorie ait été utilisée pour optimiser la couverture spatiale dans des travaux antérieurs. Notre recherche comble cette lacune en proposant une nouvelle architecture topologique basée sur une adaptation de la théorie de la répulsion des paires électroniques (VSEPR), avec pour objectif d’améliorer l’efficacité des transmissions dans les FANET tout en optimisant la couverture spatiale. Cette architecture repose sur une organisation en grappes (clusters), où chaque cluster est un ensemble de nœuds coordonnés par un nœud central, également appelé nœud principal. Dans le cadre de ce travail, un cluster peut contenir entre 1 et 12 nœuds secondaires, et le réseau peut être composé de plusieurs clusters interconnectés. Cette structure hiérarchique, optimisée par l’algorithme VBCA (Virtual Forces Based Clustering Algorithm), offre plusieurs avantages significatifs pour répondre aux défis spécifiques des FANET, notamment en termes de communication, de couverture, et de complexité computationnelle :

Premièrement, l’utilisation de la théorie VSEPR permet de concevoir une topologie nativement en trois dimensions (3D), éliminant ainsi le besoin de transformations complexes des coordonnées de 2D à 3D, souvent réalisées via des projections cylindriques ou sphériques dans d’autres approches [60], [61]. Ces transformations, qui nécessitent des approximations et des calculs intensifs, introduisent une complexité computationnelle de type NP-difficile, augmentant la charge de calcul et pouvant entraîner des erreurs dans la répartition spatiale

des nœuds. En revanche, notre approche VSEPR positionne les nœuds directement en 3D en s'inspirant des forces de répulsion électronique, ce qui réduit considérablement la puissance de calcul requise tout en garantissant une répartition spatiale précise et optimale. Cet avantage est particulièrement crucial pour les FANET, où les drones évoluent dans un espace tridimensionnel et où les ressources computationnelles embarquées sont souvent limitées.

Deuxièmement, l'architecture en grappes améliore l'efficacité de la communication en distinguant deux niveaux de transmission : les communications intra-cluster et inter-cluster. Les communications intra-cluster, qui se déroulent entre le nœud central et les nœuds secondaires d'un même cluster, sont privilégiées pour minimiser la latence et réduire la redondance des messages. En effet, dans un FANET sans structure hiérarchique, la communication simultanée de plusieurs nœuds peut entraîner une saturation de la bande passante, augmentant le risque de perte de paquets et dégradant la qualité de service. En structurant le réseau en grappes, notre approche limite ces problèmes en confinant les échanges locaux au sein de chaque cluster, tandis que les communications inter-cluster, gérées par les nœuds centraux, permettent une coordination globale entre les grappes. Par exemple, lors d'une mission de surveillance, un nœud secondaire peut transmettre ses données (images, mesures) au nœud central de son cluster, qui les agrège avant de les relayer à un autre cluster ou à une station de base, réduisant ainsi le trafic réseau global et améliorant la fluidité des communications.

Troisièmement, la topologie en grappes, optimisée par la théorie VSEPR, garantit une couverture spatiale optimale de la zone de survol, un aspect critique pour les FANET, où la couverture et la communication sont étroitement liées. Grâce à la répartition 3D des nœuds, chaque cluster peut couvrir une portion spécifique de la zone de survol, et les clusters

collaborent pour éviter les chevauchements ou les zones non couvertes. Cette coordination inter-cluster, facilitée par les nœuds centraux, permet une répartition équilibrée des tâches de surveillance ou de collecte de données, améliorant ainsi l'efficacité globale de la mission. Par exemple, dans une mission de recherche et sauvetage, les clusters peuvent se répartir dynamiquement pour couvrir une zone sinistrée, ajustant leurs positions en temps réel pour maximiser la couverture tout en maintenant une connectivité robuste. En combinant une topologie 3D optimisée et une communication hiérarchique, notre architecture offre une solution intégrée pour répondre aux exigences des FANET dans des scénarios complexes.

L'originalité de notre optimisation topologique basée sur la théorie VSEPR pour les FANET repose sur trois aspects fondamentaux, qui distinguent notre approche des travaux antérieurs et apportent des solutions innovantes aux défis spécifiques de ces réseaux :

– *Une communication contrôlée et efficace*

L'organisation du réseau en grappes (clusters) vise à optimiser la gestion des communications en structurant les liens de manière hiérarchique. Dans notre architecture, l'accès au lien air-terre (vers les stations de base) est exclusivement géré par les nœuds centraux, évitant ainsi une accessibilité directe par tous les nœuds du réseau, ce qui réduirait le trafic réseau et les risques de congestion. Cette centralisation permet d'alléger le réseau en évitant les goulots d'étranglement, souvent causés par un trafic intense et des pertes de données dans des architectures non hiérarchiques. Le nœud central remplit trois fonctions principales : (i) la collecte des données provenant des nœuds périphériques (drones secondaires) de son cluster, (ii) la coordination de ces nœuds pour maintenir une répartition spatiale optimale, et (iii) la transmission des données agrégées vers la station de base. Par ailleurs, les nœuds centraux communiquent entre eux pour gérer les communications inter-

cluster, notamment pour éviter les collisions entre drones et coordonner le partage de l'espace 3D. Dans certains scénarios, un nœud central peut également agir comme un relais pour d'autres clusters, renforçant ainsi la connectivité globale du réseau. Cette approche hiérarchique, combinée à une gestion intelligente des communications intra- et inter-cluster, améliore la fluidité des transmissions et réduit les pertes de paquets, un problème fréquent dans les FANET en raison de leur forte mobilité et des interférences.

– *Une auto-organisation en cas de perte d'un nœud central*

Un aspect innovant de notre travail réside dans la capacité du réseau à s'autoorganiser de manière autonome en cas de défaillance d'un nœud central, une problématique souvent négligée dans les études précédentes sur l'application de la théorie VSEPR aux FANET [58], [59], [62]. Dans une topologie centralisée comme la nôtre, la perte d'un nœud central peut entraîner une déconnexion complète du cluster, voire une défaillance totale du réseau si aucune mesure de récupération n'est prévue. Pour pallier ce risque, nous proposons un mécanisme de tolérance aux pannes qui permet aux nœuds périphériques d'un cluster affecté de s'intégrer dynamiquement à un autre cluster à proximité. Ce mécanisme repose sur une mise à jour continue de l'état du nœud central par les nœuds périphériques : si un nœud central est détecté comme défaillant (par exemple, en raison d'une panne de batterie ou d'une perte de signal), un protocole de récupération est activé. Ce protocole identifie le cluster le plus proche et réassigne les nœuds périphériques orphelins, en ajustant leur position spatiale selon les principes de la théorie VSEPR pour maintenir une couverture optimale. Cet aspect d'auto-organisation constitue un fondement clé de notre topologie, garantissant la résilience du réseau face aux imprévus.

– *Une solution indépendante et transposable sur d'autres réseaux mobiles*

L'algorithme VBCA, développé dans ce travail, est conçu pour être générique et indépendant de la mission spécifique des FANET, ce qui le rend adaptable à d'autres types de réseaux mobiles, tels que les réseaux véhiculaires (VANET) ou ferroviaires. Un défi majeur dans ces réseaux est le maintien d'un chemin de communication continu entre émetteur et récepteur, souvent interrompu par la mobilité élevée des nœuds ou les obstacles environnementaux. Notre approche résout ce problème grâce à une technique stockage et retransmission, qui sera détaillée dans les chapitres ultérieurs. Cette technique permet aux nœuds de stocker temporairement les données en cas d'interruption de la connectivité, puis de les retransmettre une fois qu'un chemin de communication est rétabli. Par exemple, dans un réseau véhiculaire, un véhicule peut stocker des données critiques (comme des alertes de sécurité) et les transmettre à un autre véhicule ou à une infrastructure dès que la connexion est rétablie, garantissant ainsi une communication robuste malgré les aléas de la mobilité. Cette adaptabilité de notre algorithme à différents contextes renforce son potentiel d'application dans divers domaines des réseaux ad hoc mobiles.

Les principales contributions escomptées de ce travail de recherche peuvent ainsi être résumées comme suit :

- **Une architecture fiable et efficace pour les FANET, indépendante de la mission.**

Notre topologie en grappes, optimisée par la théorie VSEPR, garantit une communication fluide et une couverture spatiale optimale, tout en intégrant des mécanismes de tolérance aux pannes pour assurer la résilience du réseau.

- **Un algorithme générique applicable aux FANET et à d'autres réseaux mobiles.**

L'algorithme VBCA, grâce à sa conception modulaire et à sa technique de stockage et retransmission, peut être adapté à divers types de réseaux ad hoc, offrant une solution polyvalente pour les environnements dynamiques.

- **Une réduction des coûts d'implémentation.** La méthode proposée peut être intégrée sous forme de logiciel embarqué, éliminant le besoin de matériel supplémentaire et réduisant ainsi les coûts de déploiement.
- **Une optimisation conjointe de la topologie et de la transmission.** En combinant une répartition spatiale 3D optimale et une gestion hiérarchique des communications, notre approche améliore simultanément la couverture et l'efficacité des transmissions, répondant ainsi aux exigences des missions complexes des FANET

Le second axe de recherche porte sur l'optimisation de la fiabilité des nœuds centraux, qui constituent le cœur de notre architecture en grappes et jouent un rôle critique dans la coordination des nœuds périphériques et la transmission des données vers les stations de base. En raison de leurs fonctions multiples — collecte, agrégation et relais des données, ainsi que coordination spatiale des drones secondaires —, les nœuds centraux sont soumis à une consommation énergétique élevée, ce qui augmente leur vulnérabilité aux défaillances. Ces défaillances peuvent avoir diverses origines, notamment des défauts de fabrication (ex. : dysfonctionnement des capteurs ou des systèmes de communication), une surconsommation d'énergie liée à une charge de communication intense, des conditions environnementales défavorables (ex. : températures extrêmes ou vents forts affectant la stabilité), ou encore des facteurs liés à leur position dans le réseau (ex. : interférences électromagnétiques accrues en

cas de proximité avec d'autres clusters). De plus, des paramètres dynamiques, tels que le nombre de nœuds périphériques à coordonner ou les changements fréquents de zone de survol, peuvent exacerber ces risques, rendant une étude approfondie de la fiabilité des nœuds centraux indispensable pour garantir la robustesse du réseau.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons une analyse systématique des causes et des effets des défaillances des nœuds centraux, en nous appuyant sur des outils probabilistes avancés, notamment les réseaux bayésiens dynamiques. Ces modèles graphiques permettent de modéliser les relations de cause à effet entre les différents facteurs de défaillance (consommation énergétique, charge de communication, conditions environnementales) et leurs impacts sur la performance du nœud central, tout en prenant en compte les incertitudes inhérentes à un système aussi dynamique qu'un FANET. Dans cette partie de notre travail, nous nous concentrons particulièrement sur deux causes principales de défaillance : la gestion de la communication et l'optimisation de l'énergie. Une charge de communication mal équilibrée — par exemple une transmission simultanée de données par un grand nombre de nœuds périphériques — peut entraîner une surconsommation d'énergie, accélérant l'épuisement de la batterie du nœud central. Par exemple, lors d'une mission de surveillance où les nœuds secondaires envoient continuellement des flux de données (images, vidéos), le nœud central peut être rapidement saturé, augmentant le risque de surchauffe ou de panne. En utilisant les réseaux bayésiens dynamiques, nous modélisons ces scénarios pour identifier les seuils critiques de consommation énergétique et de charge de communication, et proposer des stratégies d'optimisation, telles que l'ajustement dynamique de la cadence de communication ou la répartition de la charge entre plusieurs nœuds centraux. Cette approche complète les mécanismes de tolérance aux pannes déjà intégrés dans notre topologie, comme

l'auto-organisation en cas de perte d'un nœud central, en offrant une solution proactive pour prévenir les défaillances avant qu'elles ne surviennent

2.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements de notre travail de recherche, qui s'articule autour de deux axes complémentaires visant à répondre aux défis majeurs des réseaux FANET : une communication adaptée et une gestion optimisée de l'énergie pour assurer la fiabilité du réseau. Le premier axe a introduit une nouvelle topologie en grappes, optimisée par l'algorithme VBCA et inspirée de la théorie VSEPR, qui améliore significativement la communication grâce à une gestion hiérarchique des transmissions intra- et inter-cluster, tout en garantissant une couverture spatiale optimale en 3D. Cette architecture facilite également la coordination du réseau via les nœuds centraux, tout en intégrant des mécanismes d'auto-organisation pour maintenir la connectivité en cas de défaillance. Le second axe s'est concentré sur la fiabilité des nœuds centraux, éléments critiques de notre topologie, en proposant une analyse approfondie des causes de défaillance (notamment la surconsommation énergétique et la charge de communication) à l'aide des réseaux bayésiens dynamiques. Cette approche permet d'anticiper les défaillances et d'optimiser la gestion de l'énergie, renforçant ainsi la robustesse du réseau face aux contraintes dynamiques des FANET. Ensemble, ces deux axes posent les bases d'une solution intégrée pour le déploiement de FANET autonomes et performants, avec un algorithme, qui se distingue par sa généricité et sa transposabilité à d'autres réseaux mobiles, tels que les réseaux véhiculaires. Les chapitres suivants approfondiront ces contributions à travers des simulations détaillées, en explorant notamment les performances de notre topologie dans des scénarios réels et les

stratégies d'optimisation énergétique pour prolonger la durée de vie des nœuds centraux, ouvrant ainsi la voie à une validation expérimentale future.

Chapitre 3 - Méthodologie et Impact de la topologie sur le réseau FANET

3.1 Méthodologie

3.1.1 Introduction : contexte, objectifs, structure

Comme présenté dans le chapitre précédent, notre travail s'articule autour de deux axes principaux : l'optimisation de la topologie et l'amélioration de la fiabilité des nœuds centraux. Ce chapitre se concentre sur le premier axe, en examinant l'impact de la topologie en grappes, optimisée par l'algorithme VBCA et inspirée de la théorie VSEPR, sur les performances des réseaux FANET. L'objectif de cette section est de démontrer l'efficacité de notre architecture topologique face aux défis spécifiques des réseaux ad hoc fortement mobiles, en l'occurrence les FANET, où la mobilité rapide des drones, combinée à des contraintes technologiques et environnementales, impose des exigences élevées en termes de connectivité, de couverture, et de gestion des ressources. Une topologie bien conçue est essentielle pour atténuer ces contraintes, en optimisant la répartition spatiale des nœuds, en réduisant les interférences, et en facilitant une communication robuste et économe en énergie.

3.1.2 Impact de la topologie : défis et enjeux

Les FANET sont confrontés à des limitations à plusieurs niveaux, qui peuvent être regroupées en deux catégories principales : les contraintes technologiques et les défis environnementaux. Sur le plan technologique, les drones opérant dans un FANET doivent composer avec des ressources limitées, notamment une bande passante restreinte, des délais de transmission (latence) élevés, et un risque accru de perte de paquets, en particulier dans des scénarios où de multiples nœuds transmettent simultanément des données (ex. : flux vidéo lors d'une mission de surveillance). Ces contraintes sont exacerbées par la forte mobilité des drones, qui entraîne des changements fréquents dans la topologie du réseau, rendant difficile le maintien d'une connectivité stable. Sur le plan environnemental, les drones évoluent dans des espaces de survol variés — passant rapidement d'un environnement forestier à un milieu urbain, semi-urbain, ou maritime — ce qui introduit des phénomènes de propagation complexes. Parmi ces phénomènes, l'effet d'ombrage (shadowing) résulte de l'atténuation du signal causée par des obstacles physiques, tels que des bâtiments ou des arbres, bloquant directement la ligne de visée entre les nœuds. Par ailleurs, l'évanouissement du signal (fading) se manifeste par des variations rapides de la puissance du signal, dues à des phénomènes de réflexion, de diffraction, ou de propagation multi-trajets, où le signal atteint le récepteur par plusieurs chemins différents. Ces variations peuvent être influencées par des facteurs tels que la position géographique des drones, la fréquence de transmission, ou les conditions météorologiques (ex. : pluie, brouillard), qui amplifient les interférences et dégradent la qualité de la communication. Par exemple, dans un environnement urbain, les réflexions sur les bâtiments peuvent provoquer un évanouissement multi-trajets, tandis que

des vents forts ou des précipitations peuvent accentuer l'atténuation du signal, augmentant ainsi le risque de perte de connectivité.

Face à ces défis, une topologie adaptée, telle que notre architecture en grappes, joue un rôle crucial pour améliorer les performances globales du réseau. En structurant le réseau en clusters coordonnés par des nœuds centraux, notre approche permet de réduire les interférences en limitant les communications simultanées, d'optimiser la bande passante en hiérarchisant les transmissions (intra- et inter-cluster), et de minimiser la latence grâce à une gestion centralisée des données. De plus, la répartition spatiale en 3D, inspirée de la théorie VSEPR, garantit une couverture optimale de la zone de survol, même dans des environnements hétérogènes, tout en atténuant les effets de l'ombrage et de l'évanouissement en ajustant dynamiquement la position des nœuds pour maintenir une ligne de visée claire. Les sections suivantes détailleront la méthodologie utilisée pour concevoir et évaluer cette topologie, en s'appuyant sur des simulations pour quantifier son impact sur des métriques clés telles que la couverture, la latence, la consommation énergétique, et la robustesse face aux défaillances

3.1.3 Une architecture topologique dédiée : proposition de la topologie VSEPR

Les phénomènes décrits précédemment — tels que l'ombrage, l'évanouissement du signal, et les variations rapides dues à la mobilité des drones — introduisent une complexité significative dans la gestion de la communication au sein des FANET. La forte mobilité des nœuds, qui entraîne des changements fréquents dans la topologie du réseau, rend la prédiction des liens de communication particulièrement difficile, notamment dans des scénarios impliquant des dizaines, voire des milliers de drones. Par exemple, dans une mission de

surveillance à grande échelle, la position relative des nœuds peut changer en quelques secondes, perturbant les chemins de communication et augmentant le risque de perte de paquets. De plus, la gestion d'un grand nombre de nœuds pose des défis en termes de partage de la bande passante, car les communications simultanées peuvent saturer le réseau, augmentant la latence et dégradant la qualité de service. À cela s'ajoute la difficulté d'agréger les données provenant de multiples sources et de suivre individuellement chaque nœud, une tâche essentielle pour coordonner les drones et assurer l'efficacité de la mission. Enfin, la modélisation mathématique précise de l'environnement physique reste un défi majeur en raison de la nature dynamique et imprévisible des variables en jeu, telles que les conditions météorologiques, les obstacles, et les interférences.

Pour répondre à ces problématiques, une architecture topologique dédiée est indispensable, capable de prendre en compte les contraintes spécifiques des FANET tout en optimisant la communication, la couverture, et la gestion des ressources. Dans ce contexte, nous proposons une topologie en grappes basée sur la théorie de la répulsion des paires électroniques (VSEPR), qui structure le réseau en petites cellules (clusters) coordonnées par un nœud central. Cette organisation hiérarchique offre plusieurs avantages. Premièrement, elle réduit la charge de communication globale en confiant la gestion des transmissions vers la station de base aux nœuds centraux, limitant ainsi les communications directes entre les nœuds périphériques et la station. Cela permet de désengorger le réseau, de minimiser les interférences, et d'optimiser l'utilisation de la bande passante, en particulier dans des scénarios à forte densité de nœuds. Deuxièmement, la théorie VSEPR est utilisée pour positionner les nœuds de manière optimale dans un espace tridimensionnel, en s'inspirant des forces de répulsion électronique pour minimiser les chevauchements et maximiser la

couverture spatiale. Par exemple, dans un cluster, les nœuds périphériques sont disposés autour du nœud central selon une géométrie qui réduit les interférences et maintient une ligne de visée claire, atténuant ainsi les effets de l'ombrage et de l'évanouissement. Troisièmement, cette topologie intègre des mécanismes d'auto-organisation, permettant au réseau de s'adapter dynamiquement aux changements de position des nœuds ou aux défaillances, un aspect qui sera approfondi dans le chapitre suivant dédié à la reconfiguration dynamique.

La conception et l'évaluation de cette topologie seront détaillées dans les sections suivantes, où nous présenterons l'adaptation de la théorie VSEPR pour la répartition des nœuds, le développement de l'algorithme VBCA pour la gestion des clusters, et les résultats des simulations comparatives avec d'autres approches topologiques. Ces analyses permettront de quantifier les améliorations apportées par notre architecture en termes de couverture spatiale, de latence de communication, de consommation énergétique, et de robustesse, confirmant ainsi son efficacité face aux défis complexes des réseaux FANET.

3.1.4 Perspectives : optimisation de la fiabilité des nœuds centraux

Enfin, dans la dernière partie de ce travail, il sera question de l'optimisation des nœuds centraux. En effet, suivant la topologie choisie les nœuds centraux sont les enjeux majeurs du réseau. Il est primordial de les rendre optimaux. C'est-à-dire avoir une certaine capacité de prédiction des problèmes qui peuvent survenir tout au long de la mission. Les problèmes peuvent être de différentes sources comme la météo, la durée de vol, le nombre de communication, la zone de survol etc. Une fois, les problèmes identifiés, plusieurs solutions d'optimisation sont disponibles. Dans le cadre de ce projet, qui consiste sur les réseaux FANET où la topologie peut être représentée par un graphe, le choix est porté sur les réseaux

dynamiques bayésien (RDB), ce choix sera détaillé dans le chapitre 5. L'idée est d'étudier l'évolution du réseau dans le temps avec les différentes problématiques citées ci-haut. Les problèmes identifiés à part les défauts de fabrication, ont incidence directe sur l'énergie des nœuds. En conséquence, le paramètre à optimiser sera la batterie des nœuds centraux. Puisqu'il est impossible de recharger un nœud central en ligne dans le cadre de ce travail, le manque d'énergie durant un vol peut rapidement amener la perte d'un cluster. Ainsi, les réseaux dynamiques bayésiens, qui sont en fait, une combinaison de théorie de graphes et probabilités permettent de modéliser et inférer ces clusters de façon préventive. En plus de leur efficacité et robustesse, les réseaux dynamiques bayésiens sont faciles à mettre à mettre en œuvre. Ils représentent efficacement les FANET grâce à la théorie des graphes.

Le niveau d'énergie d'un nœud central permet de déterminer et prévenir la perte d'un cluster. Il permet également la maintenance des nœuds. Pour cela, selon le niveau d'énergie disponible, un nœud déterminera s'il est possible de continuer la mission ou non. Ainsi donc, une optimisation de la batterie permet d'éviter des situations désastreuses, comme la perte d'un nœud central ou reconfiguration du réseau.

Bien que ce chapitre se concentre sur l'impact de la topologie en grappes sur les performances des réseaux FANET, il est important de souligner que cette architecture, en raison de sa nature hiérarchique, place les nœuds centraux au cœur de la coordination et de la communication du réseau. Comme mentionné dans les sections précédentes, les nœuds centraux sont responsables de la gestion des transmissions intra- et inter-cluster, de l'agrégation des données, et de la communication avec la station de base, ce qui les rend particulièrement vulnérables à des défaillances. Ces défaillances peuvent résulter de divers facteurs, tels que des conditions météorologiques défavorables (ex. : vents forts ou

précipitations augmentant la consommation énergétique pour maintenir la stabilité), une durée de vol prolongée épuisant la batterie, un volume élevé de communications saturant leurs capacités, ou encore des variations dans la zone de survol (ex. : environnements urbains avec des interférences accrues). Dans un contexte où le rechargement en vol des nœuds centraux n'est pas réalisable, une gestion optimale de leur énergie devient cruciale pour éviter des interruptions critiques, telles que la perte d'un cluster ou la nécessité d'une reconfiguration complète du réseau.

Pour répondre à cette problématique, la dernière partie de ce travail, qui sera détaillée dans le Chapitre 5, se concentrera sur l'optimisation de la fiabilité des nœuds centraux, en mettant l'accent sur la prédiction et la prévention des défaillances. À cette fin, nous proposons l'utilisation des réseaux bayésiens dynamiques (RBD), une approche probabiliste qui combine la théorie des graphes et les probabilités pour modéliser l'évolution temporelle du réseau face aux contraintes identifiées. Les RBD permettent de représenter le FANET sous forme d'un graphe, où les nœuds et leurs relations (communications, dépendances énergétiques) sont modélisés comme des variables probabilistes. Par exemple, ils peuvent estimer la probabilité de défaillance d'un nœud central en fonction de facteurs tels que la consommation énergétique, le volume de communications, ou les conditions environnementales, et proposer des stratégies d'optimisation, comme l'ajustement dynamique de la charge de communication pour préserver l'énergie. Un paramètre clé dans cette optimisation sera la gestion de la batterie des nœuds centraux, car le niveau d'énergie disponible détermine non seulement la capacité d'un nœud à poursuivre la mission, mais également la possibilité de planifier une maintenance préventive, évitant ainsi des interruptions critiques. Cette approche proactive, qui sera approfondie dans les chapitres

suivants, complète l'architecture topologique présentée dans ce chapitre en renforçant la résilience globale du réseau FANET face aux aléas opérationnels.

3.2 Généralités sur la théorie VSEPR : principes et fondements

Cette section vise à poser les bases théoriques de VSEPR avant d'expliquer son adaptation pour la conception de notre topologie en grappes dans les FANET. Nous commençons par une présentation du modèle de Lewis, qui constitue une étape préliminaire pour appliquer VSEPR, avant d'aborder les principes fondamentaux de la théorie et ses géométries de base.

3.2.1 *Le modèle de Lewis : une étape préalable à l'application de VSEPR*

La théorie de la répulsion des paires d'électrons de la couche de valence, connue sous l'acronyme VSEPR (Valence Shell Electron Pair Repulsion), est un modèle chimique développé pour prédire la géométrie tridimensionnelle des molécules en fonction des interactions entre les paires d'électrons de la couche de valence d'un atome central. Initialement, les structures moléculaires étaient représentées en deux dimensions à l'aide de la structure de Lewis, qui permet de visualiser les liaisons covalentes et les paires d'électrons non liants. Cependant, cette représentation bidimensionnelle ne reflète pas la réalité tridimensionnelle des molécules, où les distances de liaison, les angles entre les liaisons, et la disposition spatiale des atomes jouent un rôle déterminant dans les propriétés chimiques et physiques [63]. La théorie VSEPR comble cette lacune en proposant un cadre pour déterminer la géométrie moléculaire en se basant sur le principe fondamental que les paires d'électrons de la couche de valence — qu'elles soient liantes (formant des liaisons avec

d'autres atomes) ou non liantes (paires libres) — se repoussent mutuellement en raison de leur charge négative, adoptant ainsi une disposition qui minimise cette répulsion [63].

3.2.2 Principes fondamentaux de la théorie VSEPR

Les fondements de la théorie VSEPR ont été posés par les chimistes britanniques Nevil Sidgwick et Herbert Powell en 1940, qui ont établi une corrélation entre la géométrie moléculaire et le nombre de paires d'électrons de valence autour d'un atome central [64]. Cette approche a été raffinée et systématisée en 1957 par le chimiste canadien Ronald J. Gillespie, qui a formulé des règles précises pour prédire les géométries moléculaires, telles que linéaire, trigonale plane, tétraédrique, ou octaédrique, en fonction du nombre de paires d'électrons [65], [66]. Selon VSEPR, la géométrie d'une molécule est déterminée par l'équilibre entre les forces de répulsion entre les paires d'électrons et les forces d'attraction entre les électrons et les noyaux des atomes. Prenons l'exemple de deux atomes d'hydrogène formant une molécule de H_2 : à grande distance, les forces d'attraction entre les électrons de l'un et le noyau de l'autre prédominent, rapprochant les atomes. À mesure que la distance diminue, les forces de répulsion entre les électrons et entre les noyaux (tous deux chargés négativement et positivement, respectivement) augmentent, jusqu'à atteindre une distance d'équilibre — appelée longueur de liaison — où les forces s'annulent, stabilisant la molécule. Dans une molécule plus complexe, comme CH_4 (méthane), les quatre paires d'électrons liantes autour de l'atome de carbone se repoussent pour adopter une géométrie tétraédrique, avec des angles de liaison d'environ $109,5^\circ$, minimisant ainsi l'énergie du système.

Bien que la théorie VSEPR ait été initialement développée pour la chimie moléculaire, ses principes de répulsion et d'optimisation spatiale présentent une analogie intéressante avec la problématique de la répartition des nœuds dans un réseau FANET. En effet, tout comme

les paires d'électrons cherchent à minimiser leur répulsion pour adopter une disposition optimale, les nœuds d'un réseau FANET peuvent être positionnés de manière à minimiser les interférences électromagnétiques et à maximiser la couverture spatiale, en adoptant une géométrie tridimensionnelle inspirée des arrangements moléculaires. Cette analogie constitue le fondement de notre approche pour concevoir une topologie en grappes, comme nous le détaillerons dans les sections suivantes, où les concepts de VSEPR seront adaptés pour optimiser la répartition spatiale des drones dans un espace 3D

3.3 Description des principes de la théorie VSEPR

La théorie VSEPR repose sur le principe fondamental que les paires d'électrons de la couche de valence d'un atome central — qu'il s'agisse de paires liantes (impliquées dans des liaisons covalentes avec d'autres atomes) ou de paires non liantes (également appelées paires libres) — se repoussent mutuellement en raison de leur charge négative, adoptant une disposition spatiale qui minimise ces répulsions [66]. Pour atteindre cet état d'équilibre, les paires d'électrons maximisent les distances qui les séparent, ce qui détermine la géométrie tridimensionnelle de la molécule. La prédiction de cette géométrie commence par l'analyse de la structure de Lewis de la molécule, qui permet d'identifier le nombre de paires d'électrons (liantes et non liantes) autour de l'atome central. En fonction de ce nombre, VSEPR définit des arrangements géométriques standards, tels que linéaire (2 paires), trigonale plane (3 paires), tétraédrique (4 paires), trigonale bipyramidale (5 paires), ou octaédrique (6 paires), chacun associé à des angles de liaison spécifiques. Par exemple, dans une molécule comme CH_4 (méthane), les quatre paires liantes autour de l'atome de carbone adoptent une géométrie tétraédrique avec des angles de liaison de $109,5^\circ$, tandis que dans

NH_3 (ammoniac), la présence d'une paire non liante réduit l'angle de liaison à environ 107° en raison de sa répulsion plus forte par rapport aux paires liantes.

Outre les répulsions entre les paires d'électrons, d'autres interactions influencent l'arrangement final de la molécule, bien que VSEPR les simplifie pour se concentrer sur les paires d'électrons. Parmi ces interactions, on note les répulsions entre les noyaux des atomes (tous deux chargés positivement) et les attractions entre les noyaux et les électrons des autres atomes (charges opposées). Ces forces, bien que secondaires dans le modèle VSEPR, contribuent à l'équilibre énergétique global de la molécule. Par exemple, dans une molécule simple comme H_2 , les forces d'attraction entre les électrons d'un atome et le noyau de l'autre prédominent à grande distance, rapprochant les atomes, tandis que les répulsions entre les électrons et entre les noyaux augmentent à courte distance, stabilisant la molécule à une longueur de liaison optimale. Dans des molécules plus complexes, la géométrie prédite par VSEPR est souvent ajustée pour tenir compte des différences de répulsion : les paires non liantes, occupant plus de place que les paires liantes, déforment les angles de liaison, comme observé dans NH_3 ou H_2O (géométrie coudée, angle de $104,5^\circ$).

Pour illustrer ces principes, les Tableaux 1 et 2 ci-dessous présentent les géométries de base prédites par VSEPR pour différentes configurations de paires d'électrons autour d'un atome central, avec des exemples de molécules correspondantes (ex. : CO_2 pour la géométrie linéaire, BF_3 pour la trigonale plane, CH_4 pour la tétraédrique). Ces géométries constituent une base théorique essentielle pour notre travail, car elles inspirent la répartition spatiale des nœuds dans notre topologie en grappes. En effet, l'idée de minimiser les répulsions pour optimiser la disposition spatiale peut être adaptée aux FANET, où les nœuds (drones) doivent

être positionnés de manière à minimiser les interférences électromagnétiques tout en maximisant la couverture 3D, comme nous le détaillerons dans la section suivante.

3.4 Règles de base de la théorie VSEPR

Avant d'aborder les principes de la théorie VSEPR, il est essentiel de comprendre le modèle de Lewis, qui constitue une étape préliminaire pour analyser la disposition des électrons de valence autour d'un atome central. Développé par Gilbert N. Lewis en 1916, ce modèle représente les électrons de valence des atomes sous forme de points ou de traits, permettant de visualiser les liaisons covalentes et les paires d'électrons non impliquées dans les liaisons [67]. Dans ce cadre, une liaison entre deux atomes est décrite par la mise en commun d'un doublet d'électrons, appelé doublet liant, qui correspond généralement à une liaison covalente simple (ou multiple dans le cas de doublets ou triplets partagés). Les paires d'électrons qui ne participent pas aux liaisons sont désignées comme des doublets non liants, ou paires libres, et jouent un rôle crucial dans la détermination de la géométrie moléculaire.

La structure de Lewis permet ainsi de représenter une molécule sous la forme générique AX_nE_m , où A désigne l'atome central, X les atomes liés à A (correspondant aux doublets liants), et E les doublets non liants présents autour de A. Par exemple, dans le cas de la molécule d'ammoniac (NH_3), l'atome central d'azote (A) est lié à trois atomes d'hydrogène (X_3) et possède un doublet non liant (E), ce qui donne la notation AX_3E . Cette représentation est fondamentale pour l'application de la théorie VSEPR, car elle permet de compter le nombre total de paires d'électrons (liantes et non liantes) autour de l'atome central, un prérequis pour prédire la géométrie moléculaire en minimisant les répulsions entre ces paires, comme nous le verrons dans les sous-sections suivantes.

Doublets	Liants : X	Non liants : E
Nombre	N	M

Tableau 1 Règle de base


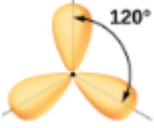
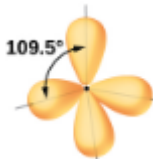
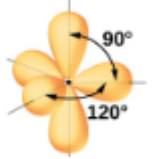
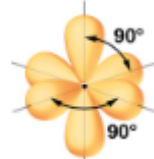




<i>Nombre de régions</i>	Deux régions de haute densité électronique	Trois régions de haute densité électronique	Quatre régions de haute densité électronique	Cinq régions de haute densité électronique	Six régions de haute densité électronique
<i>Arrangement spatial</i>					
<i>Notation ligne-tiret-coin</i>	$\text{H}-\text{Be}-\text{H}$				
<i>Géométrie des paires d'électrons</i>	Linéaire; Angle de 180°	Planaire trigonale; Tous les Angles 120°	Tétraédrique; Tous les angles 109.5°	Bipyramidal trigonal; angles de 90° ou 120° . Un atome attaché peut être équatorial	Octaédrique; tous les angles sont de 90° ou 180° .

Tableau 2 Géométrie de base [68], [69]

3.5 Détermination des géométries moléculaires avec la théorie VSEPR

Comme introduit dans les sections précédentes, la théorie VSEPR permet de prédire la géométrie tridimensionnelle d'une molécule en minimisant les répulsions entre les paires d'électrons de la couche de valence autour d'un atome central. Pour une molécule de formule générique AX_nE_m — où A est l'atome central, X les atomes liés (correspondant à n paires liantes), et E les doublets non liants (m paires non liantes) — la géométrie de base est déterminée par le nombre total de paires d'électrons autour de l'atome central, donné par la somme $n + m$. Ce nombre total définit l'arrangement spatial des paires d'électrons, qui peut être linéaire ($n + m = 2$), trigonale plane ($n + m = 3$), tétraédrique ($n + m = 4$), trigonale bipyramidale ($n + m = 5$), ou octaédrique ($n + m = 6$), comme présenté dans le Tableau 1 et 2 ci-dessus. Cependant, la géométrie moléculaire réelle, qui ne prend en compte que les positions des atomes (et non des paires non liantes), peut différer de la géométrie de base. Par exemple, pour le méthane (CH_4), la notation est AX_4E_0 (4 paires liantes, 0 paire non liante), ce qui correspond à une géométrie tétraédrique avec des angles de liaison de $109,5^\circ$. En revanche, pour l'ammoniac (NH_3), noté AX_3E_1 (3 paires liantes, 1 paire non liante), la géométrie de base est tétraédrique, mais la géométrie moléculaire réelle est trigonale pyramidale, avec des angles de liaison réduits à environ 107° en raison de la répulsion plus forte exercée par la paire non liante. Exemple géométrique avec une molécule de méthane CH_4 qui est :

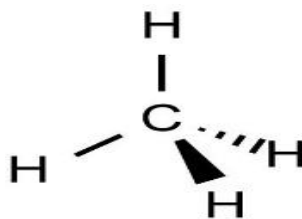


Figure 7 Géométrie de la molécule de méthane

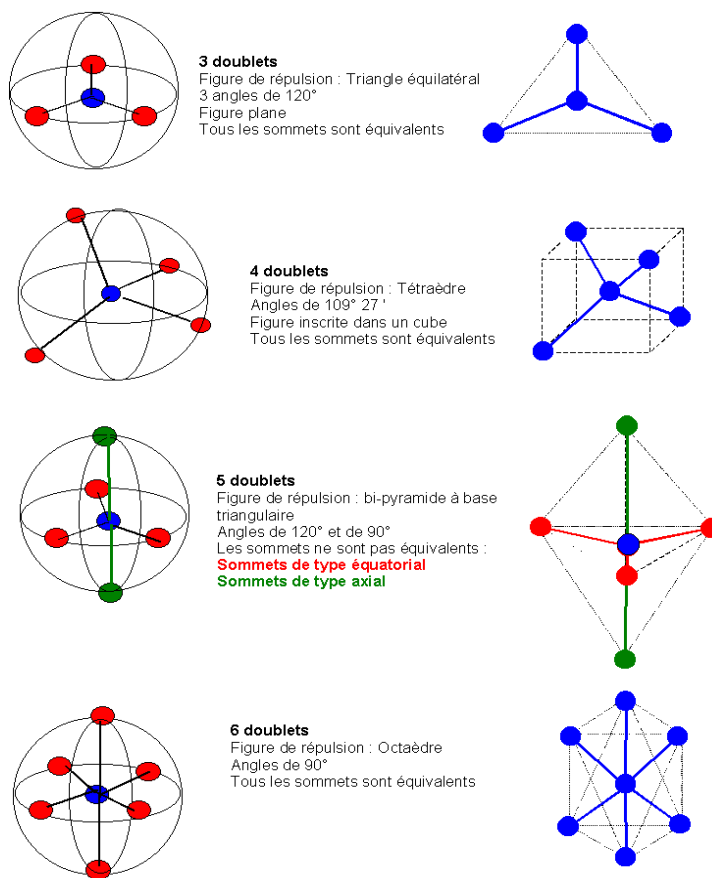


Figure 8 Géométrie selon le nombre de doublets [70]

3.6 Adaptation de la théorie VSEPR pour la conception de la topologie des FANET

Les sections précédentes ont établi les fondements théoriques de la théorie VSEPR, en expliquant comment elle prédit la géométrie tridimensionnelle des molécules en minimisant les répulsions entre les paires d'électrons de la couche de valence (sections 3.2 à 3.5). Dans cette section, nous proposons d'adapter ces principes pour concevoir une topologie en grappes pour les réseaux FANET, en s'inspirant de l'analogie entre la disposition des atomes dans une molécule et le positionnement des nœuds dans un réseau. Selon VSEPR, les atomes liés à un atome central adoptent une géométrie qui minimise les répulsions entre les paires d'électrons, comme une géométrie tétraédrique (ex. : CH_4 , AX_4E_0) ou trigonale pyramidale (ex. : NH_3 , AX_3E_1). De manière analogue, notre approche consiste à positionner les nœuds du réseau FANET autour d'un nœud central — jouant le rôle de nœud principal — de la même manière que les atomes d'une molécule sont disposés autour de l'atome central, afin d'optimiser leur répartition spatiale en 3D.

Dans cette topologie, le nœud central agit comme l'atome central (A), tandis que les nœuds voisins (membres du cluster) correspondent aux atomes liés (X). Les répulsions entre paires d'électrons dans VSEPR sont analogues aux interférences électromagnétiques entre les nœuds dans un FANET : tout comme VSEPR cherche à maximiser les distances entre les paires d'électrons pour minimiser les répulsions, nous positionnons les nœuds de manière à maximiser leur séparation spatiale, réduisant ainsi les interférences et optimisant la couverture 3D. Par exemple, une géométrie tétraédrique ($n + m = 4$) peut être utilisée pour positionner quatre nœuds autour d'un nœud principal, formant un arrangement

tridimensionnel où les angles entre les nœuds sont d'environ $109,5^\circ$, ce qui assure une répartition équilibrée dans l'espace. Cette approche permet non seulement de minimiser les interférences, mais aussi d'améliorer la connectivité intra-cluster et la couverture spatiale, répondant ainsi aux défis des FANET identifiés en section 3.1 (forte mobilité, interférences, couverture). Dans les sections suivantes, nous détaillerons l'implémentation de cette topologie à l'aide de l'algorithme VBCA et présenterons une évaluation de ses performances à travers des simulations.

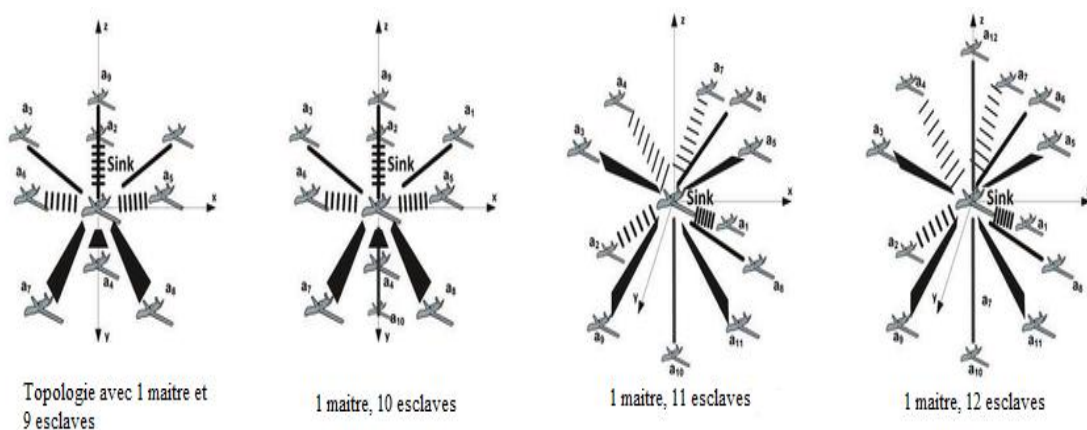


Figure 9 Géométrie issue de VSEPR appliquée aux FANET [71]

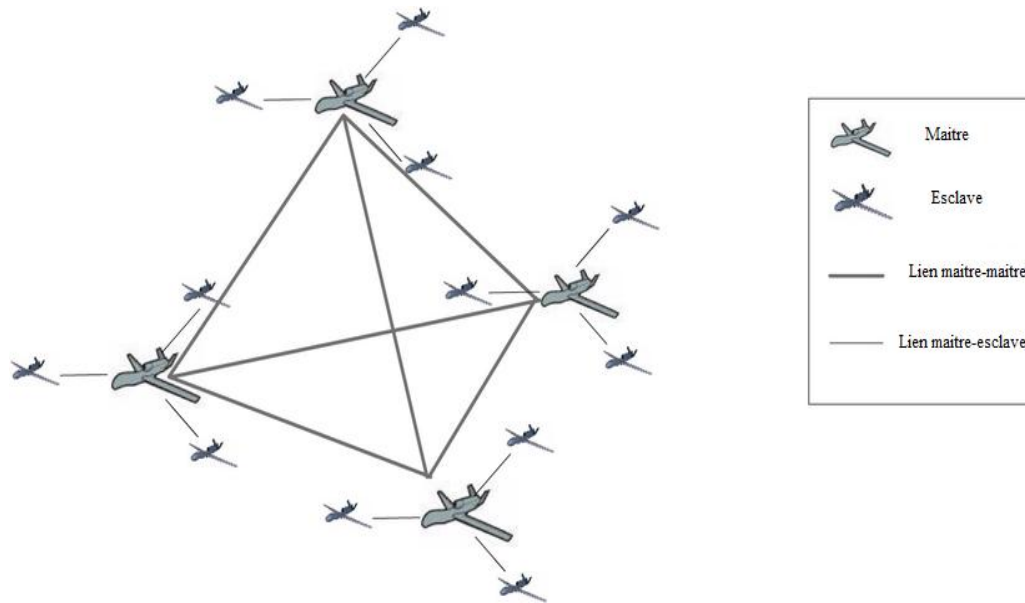


Figure 10 Un exemple de cluster

3.7 Algorithme de positionnement des nœuds basé sur VBCA

Dans la section précédente (3.6), nous avons introduit une topologie en grappes pour les réseaux FANET, inspirée de la théorie VSEPR, où les nœuds sont positionnés autour d'un nœud central de manière analogue à la disposition des atomes dans une molécule. Pour mettre en œuvre cette topologie, nous utilisons un algorithme de positionnement basé sur l'approche VBCA (Virtual Forces Based Clustering Algorithm), initialement proposé par M. Akbas et al. [56]. VBCA repose sur le principe des forces virtuelles, où les nœuds sont soumis à des forces attractives et répulsives simulées, inspirées des interactions physiques, pour atteindre une configuration spatiale optimale. Dans notre contexte, ces forces sont adaptées pour refléter les principes de VSEPR, en minimisant les interférences électromagnétiques entre les nœuds (analogues aux répulsions entre paires d'électrons) tout en maximisant la couverture spatiale.

Dans notre implémentation, le positionnement des nœuds commence par la définition d'un nœud central, désigné comme le nœud principal, dont les coordonnées dans l'espace 3D sont notées (x_p, y_p, z_p) . Ces coordonnées peuvent être fixées initialement ou ajustées dynamiquement en fonction des besoins de la mission (ex. : couverture d'une zone spécifique). Les nœuds membres du cluster, appelés nœuds secondaires dans le cadre de VBCA, sont positionnés relativement à la position du nœud principal, en respectant les géométries inspirées de VSEPR. Une distance r , appelée rayon du cluster, définit la distance entre le nœud principal et chaque nœud secondaire, assurant une répartition équilibrée dans l'espace. Contrairement à l'algorithme VBCA original, où les nœuds secondaires ne communiquent pas directement entre eux, notre approche permet une communication intra-cluster entre les nœuds secondaires, ce qui améliore la connectivité et facilite l'échange de données au sein du cluster, au prix d'une consommation énergétique accrue, comme nous l'évaluerons dans la section suivante.

Pour illustrer cette approche, considérons un cluster avec deux nœuds secondaires, correspondant à une géométrie linéaire selon VSEPR (similaire à une molécule de type AX_2E_0 , comme CO_2 , avec un angle de 180°). Dans ce cas, les positions des nœuds secondaires S_1 et S_2 autour du nœud principal P sont calculées comme suit :

Équation 1 : Calcul des Coordonnées

$$P_{S_1}(x_p, y_p, z_p) = (x_p + r, y_p, z_p),$$

$$P_{S_2}(x_p, y_p, z_m) = (x_p - r, y_p, z_p),$$

Dans ce cas, le rayon est divisé par 2, donc $r/2$. Ce qui implique la distance pour une communication entre les nœuds secondaires décroît. Le même principe est appliqué si les nœuds secondaires sont au nombre de 3. Selon la théorie VSEPR, la répulsion est à son minimum donc l'angle est de 120°

Équation 2 : Calcul des Coordonnées suite

$$P_{S_1}(x_p, y_p, z_p) = (x_p + r, y_p, z_p),$$

$$P_{S_2}(x_p, y_p, z_p) = (x_p - r \cdot \sin(30^\circ), y_p + r \cdot \sin(60^\circ), z_p),$$

$$P_{S_3}(x_p, y_p, z_p) = (x_p - r \cdot \sin(30^\circ), y_p - r \cdot \sin(60^\circ), z_p),$$

Dans ce cas, c'est un triangle équilatéral, le rayon de chaque voisin est obtenu par : $\frac{r\sqrt{3}}{3}$ la décomposition et le positionnement des nœuds se poursuit ainsi de suite avec la théorie VSEPR. Il y'a des cas particuliers où la théorie VSEPR présente des limites, car elle ne va pas au-delà de 8 nœuds périphériques. Cette limite aussi, est corrigée en modifiant la théorie, VBCA apporte une solution à cela.

3.8 Les différentes étapes

Cette partie présente la méthode de communication qui sera employée avec la théorie. Dans VBCA, les auteurs ne présentent aucune structure de communication liée à la topologie présentée. Il faudra profiter de la géométrie efficace proposée et établir une communication au sein d'un cluster. Deux types de communication se présentent, une intra cluster et une

communication inter cluster. Dans cette partie, l'intérêt de l'architecture central-secondaire sera prouvé, puisque tout le réseau ne sera constitué que des centraux-secondaires. Parmi les méthodes existantes des topologies, nous avons choisi la topologie aléatoire pour valider notre solution. En effet, la topologie aléatoire présente un avantage particulier, elle permet de donner le maximum du réseau, mais aussi la topologie adéquate dans les réseaux mobiles. Notre travail s'articule autour des axes principaux qui sont les suivants :

- Compréhension des méthodes existantes
- Simulation des méthodes existantes et leurs faiblesses
- Environnement de simulation
- Proposition de la nouvelle méthode et amélioration
- Simulation de la nouvelle méthode

3.9 Travaux Publiés sur la topologie

Nous avons présenté une topologie en grappes pour les réseaux FANET, inspirée de la théorie VSEPR et implémentée à l'aide de l'algorithme VBCA modifié, qui permet une communication entre les nœuds. Cette section vise à évaluer les performances de notre topologie en comparaison avec une méthode de référence, la topologie aléatoire, couramment utilisée dans les réseaux ad hoc pour sa simplicité mais limitée par son manque d'optimisation spatiale, comme identifié en section 3.1.2 (forte mobilité, interférences, couverture).

Nous avons évalué les performances à travers quatre métriques principales, choisies pour leur pertinence dans le contexte des FANET :

Débit (*throughput*) : mesure de la quantité de données transmises avec succès par unité de temps, exprimée en Mbps, pour évaluer l'efficacité de la communication.

Délai (*end-to-end delay*) : temps moyen nécessaire pour qu'un paquet transite de la source à la destination, exprimé en millisecondes, pour quantifier la latence du réseau.

Taux de paquets perdus : pourcentage de paquets non livrés, pour évaluer la fiabilité de la communication face à la mobilité et aux interférences.

Puissance relative selon les angles de positionnement : rapport entre la puissance de transmission effective et la puissance maximale, mesuré en fonction des angles entre les nœuds (ex. : $109,5^\circ$ pour une géométrie tétraédrique, 180° pour une géométrie linéaire), pour analyser l'impact de la disposition géométrique sur l'efficacité énergétique et la qualité du signal.

3.9.1 Les conditions de test

Pour ce faire, nous avons effectué des simulations à l'aide de l'outil OMNET++ [72], un simulateur largement reconnu pour l'évaluation des réseaux sans fil, en modélisant des scénarios réalistes impliquant 20 drones organisés en 4 clusters, chacun de 5 nœuds (1 nœud central et 4 nœuds secondaires) dans un espace 3D de $1000\text{ m} \times 1000\text{ m} \times 500\text{ m}$, avec une mobilité modérée (vitesse moyenne de 10 m/s). Chaque drone est équipé d'une interface radio IEEE 802.11 (Wi-Fi), standard pour les communications ad hoc dans les FANET, avec une portée de transmission de 100 m . Les drones utilisent généralement une puissance d'émission de 20 dBm , une valeur typique pour les drones offrant un équilibre optimal entre

l'efficacité des communications et la maîtrise de la consommation d'énergie. La bande passante est de 20 MHz, avec un débit théorique maximal de 54 Mbps (correspondant au standard 802.11a/g), bien que le débit effectif soit inférieur en raison des interférences et de la mobilité. Les drones évoluent dans un environnement 3D, avec une altitude entre 50m et 500m. Les nœuds secondaires sont placés dans un rayon $r = 50m$ avec des angles de 109.5° , dans une géométrie tétraédrique. Pour les paramètres de communications, le protocole de routage AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), un protocole réactif adapté aux réseaux FANET, où les routes sont établies à la demande via des messages RREQ et RREP. AODV est choisi pour sa capacité à s'adapter aux changements fréquents de topologie dus à la mobilité des drones, réduisant la surcharge de contrôle par rapport à un protocole proactif comme OLSR (Optimized Link State Routing). Le flux de données est de type CBR (Constant Bit Rate). Débit généré : 1 Mbps par drone, soit un total de 50 Mbps pour l'ensemble du réseau, pour tester les performances sous une charge modérée. Taille des paquets : 1024 octets, une taille standard pour les applications de streaming ou de surveillance. Fréquence d'envoi : 100 paquets par seconde par drone, correspondant au débit de 1 Mbps. Le modèle de propagation est le « Two-Ray Ground », il a été choisi pour son adaptation dans un environnement 3D, sa modélisation des pertes de trajet ainsi que les réflexions sur le sol. Les interférences sont modélisées en fonction de la densité des drones et de leur proximité, affectant le débit, en particulier dans la topologie aléatoire où les nœuds ne sont pas optimisés pour minimiser les interférences. Les conditions sont supposées idéales : pas de vents forts, obstacles (ex. : bâtiments), ou brouillage électromagnétique, pour simplifier l'analyse et se concentrer sur l'impact de la topologie.

3.9.2 Tests et simulations

Sur la Figure 11, une comparaison a été faite au niveau du débit entre notre topologie VBCA basée sur la théorie VSEPR et la topologie de mobilité aléatoire. Cette comparaison permet de mettre en évidence, la différence qui existe, entre notre méthode et les méthodes existantes. Nous constatons, au départ de la simulation les performances sont les mêmes.

Ensuite le réseau s'organise autour des nœuds principaux et la communication ne cesse de s'améliorer. Ces fluctuations initiales peuvent être attribuées à l'initialisation de la topologie et à la mobilité des drones, qui entraînent des ajustements dynamiques dans le positionnement des nœuds pour maintenir les géométries. Ce test a été mené sur un réseau

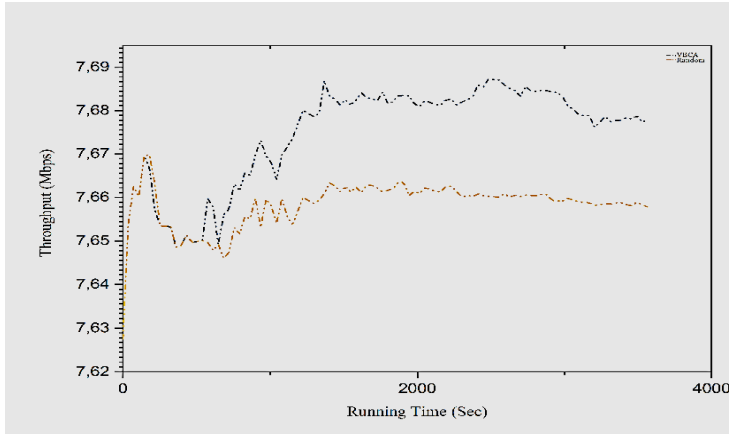


Figure 11 Débit VBCA vs Random

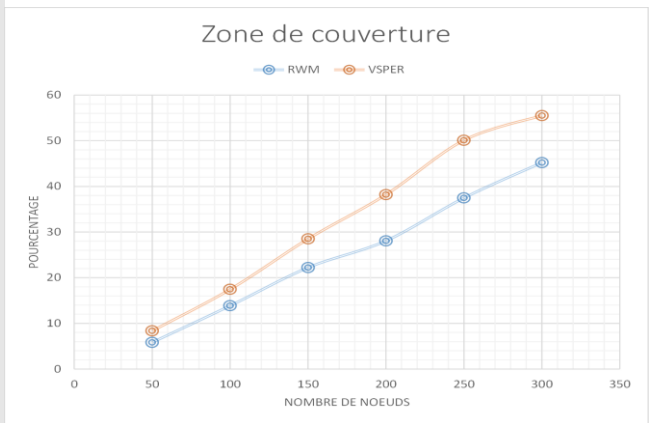


Figure 12 Zone de couverture VSEPR vs Random

de quatre (4) clusters, avec une durée de simulation de 4000 secondes. Cependant, les fluctuations observées avec VSEPR-VBCA suggèrent une sensibilité accrue aux variations de la topologie dues à la mobilité, un aspect qui sera approfondi dans l'analyse des autres métriques (délai, taux de paquets perdus). Pour la zone de couverture sur la Figure 12, nous

avons calculé le pourcentage de l'espace occupé par les deux méthodes. Nous avons une optimisation de plus de 20%

3.10 Conclusion

Ce chapitre a proposé une méthodologie complète pour la conception, l'implémentation, et l'évaluation d'une topologie en grappes pour les réseaux FANET, en s'inspirant de la théorie VSEPR (Valence Shell Electron Pair Repulsion). En s'appuyant sur les principes de répulsion spatiale de VSEPR, nous avons développé une méthode de placement des drones en 3D (section 3.7), structurée en grappes hiérarchiques, où les nœuds sont positionnés selon des géométries optimales (ex. : tétraédrique, angles de $109,5^\circ$) pour minimiser les interférences et maximiser la couverture spatiale. Cette topologie a été implémentée à l'aide de l'algorithme VBCA modifié (section 3.9), qui introduit une communication intra-cluster entre nœuds secondaires pour améliorer la connectivité, et évaluée à travers des simulations OMNET++ dans des scénarios réalistes impliquant 20 drones sur une durée de 4000 secondes (section 3.9). Les premiers résultats, notamment l'analyse du débit (section 3.9.1), montrent que notre topologie VSEPR-VBCA surpasse la topologie aléatoire, grâce à une réduction des interférences et une meilleure connectivité locale facilitée par la communication intra-cluster et le protocole AODV. Cependant, des fluctuations initiales dans le débit de VSEPR-VBCA, attribuées à la mobilité des drones et aux délais de découverte de route avec AODV, soulignent une sensibilité à la dynamique du réseau, un aspect à approfondir dans les analyses futures.

Bien que ces résultats valident partiellement l'efficacité de notre approche pour répondre aux défis des FANET (forte mobilité, interférences, couverture spatiale, section 3.1), ils mettent également en lumière certaines limites, comme l'augmentation de la consommation

énergétique due à la communication intra-cluster (section 3.9) et la nécessité d'améliorer la stabilité du débit face à la mobilité. Ces observations préparent le terrain pour les étapes suivantes de notre travail. Dans les chapitres suivants, nous proposerons une méthode de reconfiguration dynamique du réseau en cas de perte d'un nœud central (perspective évoquée en section 3.1.4), afin de garantir la résilience de la topologie. De plus, comme annoncé en section 3.1, le Chapitre 5 explorera la fiabilité des nœuds centraux à l'aide des réseaux bayésiens dynamiques (RBD), dans le but de prédire et de prévenir les défaillances, tout en optimisant la consommation énergétique pour rendre le réseau plus économe et robuste. Ces améliorations contribueront à une gestion plus efficace des ressources dans les FANET, en répondant aux contraintes énergétiques et aux exigences de fiabilité des missions critiques.

Enfin, certains aspects de notre méthodologie, notamment l'optimisation géométrique des nœuds et la communication intra-cluster, présentent un potentiel de transférabilité à d'autres réseaux ad hoc, tels que les réseaux véhiculaires (VANET). Dans les VANET, où les nœuds (véhicules) évoluent rapidement dans un espace 2D ou 3D, une disposition géométrique inspirée de VSEPR pourrait réduire les interférences et améliorer la connectivité, tandis que la communication intra-cluster pourrait faciliter l'échange de données localisées (ex. : informations de trafic). Ces perspectives seront explorées dans les travaux futurs, élargissant ainsi l'impact de notre approche au-delà des FANET

Chapitre 4 - Reconfiguration dynamique de la topologie

4.1 Revue de la littérature approfondie sur la topologie

La reconfiguration dynamique de la topologie dans les réseaux FANET constitue une problématique clé pour garantir la résilience et l'efficacité des communications, en particulier dans des scénarios où les nœuds centraux, essentiels à la coordination, peuvent être sujets à des défaillances. Dans la continuité des travaux présentés au Chapitre 3, où nous avons proposé une topologie en grappes basée sur la théorie VSEPR et implémentée avec l'algorithme VBCA, cette section vise à examiner les approches existantes dans la littérature pour le positionnement, la coordination, et la reconfiguration des réseaux FANET. L'objectif est d'identifier les méthodes pertinentes pour la gestion des défaillances, en mettant l'accent sur la reconfiguration dynamique en cas de perte d'un nœud central, afin de positionner notre contribution et de combler les lacunes identifiées.

4.1.1 Ressources et bases de données

La recherche bibliographique a été menée principalement à travers les ressources disponibles à la bibliothèque de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), qui donne accès à des bases de données scientifiques reconnues telles que IEEE Xplore, ScienceDirect, et SpringerLink. Les critères de sélection des articles incluaient des mots-clés comme "FANET topology", "UAV network reconfiguration", "3D positioning", et "failure management in ad hoc networks", avec une priorité donnée aux publications des 15 dernières

années (2010-2025) pour refléter les avancées récentes dans le domaine des réseaux ad hoc aériens. Cette recherche a permis d'identifier plusieurs approches pour la conception et la gestion des topologies dans les FANET, allant du positionnement 3D à la coordination hiérarchique, en passant par des mécanismes de reconfiguration dynamique.

4.1.2 Revue de la littérature

4.1.2.1 Approches centralisées et architectures hiérarchiques

Dans le domaine du positionnement et de la coordination en 3-D, Elston et al. [73] proposent une architecture de contrôle hiérarchisée pour une surveillance coopérative dans un réseau FANET composé d'UAV hétérogènes (drones de petite taille et à haute manœuvrabilité) et d'un appareil central (ex. : avion de longue endurance ou bateau). Leur approche repose sur la complémentarité entre les capacités des différents véhicules : l'appareil central, doté d'une endurance prolongée, d'un large rayon d'action, et de capacités de traitement avancées, agit comme une base de données distribuée et un centre de traitement, tout en contrôlant les drones. Les drones, quant à eux, exploitent leur manœuvrabilité pour collecter des données dans des zones spécifiques, transmettant ensuite ces données à l'appareil central pour analyse. Cette structure hiérarchisée tire sa force de la décomposition du système en composants spécialisés, chacun tirant parti des capacités spécifiques des véhicules impliqués. Bien que cette méthode améliore la robustesse du réseau pour des opérations coopératives, elle présente des limites : la forte dépendance à l'appareil central crée un point de défaillance unique, et l'impact de la mobilité rapide des drones sur la stabilité de la hiérarchie n'est pas suffisamment abordé. De plus, Elston et Frew ne proposent pas de

mécanisme explicite pour la reconfiguration dynamique en cas de perte de l'appareil central, une lacune critique dans des scénarios FANET où les défaillances sont fréquentes.

Dans un contexte similaire, Morgenthaler et al [74] introduisent UAVNet, un cadre de déploiement pour un réseau maillé de communication contrôlé par un utilisateur distant. UAVNet utilise des quadricoptères connectés via un réseau maillé sans fil IEEE 802.11s, où les drones agissent comme des nœuds d'un système maillé. Le logiciel UAVNet offre des fonctionnalités pour configurer, déployer, gérer, et surveiller le réseau, améliorant ainsi la communication dans des scénarios maillés. Cependant, cette approche centralisée repose sur un contrôle externe, ce qui peut poser un problème en cas de perte de connexion avec l'utilisateur distant, et elle ne propose pas de mécanisme explicite pour gérer les défaillances des nœuds. Contrairement à UAVNet, notre approche privilégie une reconfiguration autonome au sein des clusters pour maintenir la connectivité (section 4.3).

4.1.2.2 Positionnement 3D et optimisation géométrique

Le positionnement 3D des drones est un aspect central pour optimiser la couverture et réduire les interférences dans les FANET. APAWSAN [75], une des premières études à appliquer la théorie VSEPR au positionnement des drones, teste une configuration où quatre drones sont placés autour d'un drone central selon une géométrie tétraédrique (angles de $109,5^\circ$). Le drone central agit comme un puits, similaire à un réseau de capteurs sans fil. Cette approche a été étendue par VBCA. Ces travaux ont directement inspiré notre topologie VSEPR-VBCA (section 3.7), qui adopte une géométrie tétraédrique pour minimiser les interférences, tout en introduisant une communication intra-cluster (section 3.8) absente dans APAWSAN et VBCA. Toutefois, ces études ne traitent pas de la reconfiguration en cas de défaillance du nœud central, une lacune que nous abordons dans ce chapitre.

Luo et al [76] proposent une stratégie de positionnement et d'évitement des collisions pour les drones dans des scénarios de recherche, basée sur l'intensité du signal reçu (RSS) des modules de communication embarqués. Cette méthode améliore la coordination spatiale, mais elle est limitée aux scénarios de recherche et ne prend pas en compte les défaillances topologiques, un aspect critique pour les FANET.

Par ailleurs, Alzenad et al. [77] explorent une méthode de positionnement 3D basée sur l'optimisation par essaims particulaires (PSO) pour ajuster dynamiquement les positions des drones en fonction de la couverture et des interférences. Bien que cette approche permette une certaine résilience grâce à son caractère décentralisé, elle nécessite une communication intensive entre les nœuds, augmentant la consommation énergétique, un défi également identifié dans notre topologie VSEPR-VBCA (section 3.1.4).

4.1.2.3 Reconfiguration dynamique et gestion des défaillances

La gestion des défaillances et la reconfiguration dynamique sont essentielles pour maintenir la connectivité dans les FANET. Hoang D et al. [78] proposent un mécanisme de reconfiguration basé sur des protocoles de routage adaptatifs (ex. : AODV, utilisé dans nos simulations), où les nœuds détectent les défaillances et rétablissent les routes en temps réel. Bien que cette méthode soit efficace pour maintenir la connectivité, elle ne prend pas en compte l'optimisation géométrique des nœuds, un aspect central de notre approche VSEPR.

De Medeiros et al. [79] adoptent une approche basée sur le pronostic de la santé des drones, en utilisant l'algorithme RHTA (Receding Horizon Task Assignment) pour attribuer les tâches en fonction de l'état de santé et de la probabilité de défaillance. Cette méthode est prometteuse pour anticiper les défaillances, mais elle se concentre sur l'affectation des tâches

plutôt que sur la reconfiguration topologique, limitant son applicabilité directe à notre problématique.

L'algorithme de clustering et de prédiction de la mobilité MPCA [80] utilise une prédiction de la mobilité basée sur un arbre de dictionnaire et un modèle d'expiration des liens pour gérer les mises à jour fréquentes des clusters. Il désigne un leader de cluster en fonction de paramètres tels que la vitesse, la connectivité, la distance aux voisins, et le niveau de batterie, garantissant une stabilité du réseau. Cependant, cette approche se limite à la prédiction des changements topologiques et à l'élection de leaders, sans proposer de mécanisme explicite pour repositionner les nœuds après une défaillance, un aspect que nous abordons dans notre méthode.

DO-YUP Kim et al. [81], [82] proposent une gestion intégrée de la topologie en deux phases : une construction initiale par PSO à partir d'une topologie aléatoire, suivie d'un ajustement progressif basé sur la descente de gradient pour s'adapter aux mouvements des drones. Cette approche est pertinente pour gérer la forte mobilité des FANET, mais son coût de calcul, bien que réduit par la descente de gradient, reste non négligeable, et elle ne traite pas spécifiquement de la perte d'un nœud central.

4.1.2.4 Optimisation énergétique et coordination

L'optimisation énergétique est un défi récurrent dans les FANET. Perabathini et al. [83] et Wang et al. [84] utilisent l'optimisation par essaims particuliers (PSO) pour améliorer la communication et l'efficacité énergétique. Perabathini et al. [83] combinent une optimisation multi-objectifs globale (communication avec la station de base) et une optimisation énergétique individuelle avec une qualité de service (QoS), augmentant le nombre de stations de base pour améliorer la couverture.

Wang et al. [84] proposent un algorithme de routage basé sur PSO pour surmonter les limites des protocoles classiques comme AODV et GPSR, qui sont énergivores dans les FANET. Ces approches améliorent l'efficacité énergétique, mais elles ne traitent pas de la reconfiguration topologique, contrairement à notre travail qui vise à intégrer des considérations énergétiques dans la reconfiguration.

Iskandarani et al. [85] appliquent la commande prédictive par modèle linéaire (LMPC) pour coordonner des formations de drones (triangulaire, croisée), mais cette méthode, bien qu'efficace pour le suivi des trajectoires, entraîne un coût de calcul élevé pour les systèmes non linéaires, limitant son applicabilité dans des scénarios FANET dynamiques

Brust et Strimbu [86] présentent un modèle d'essaim de drones basé sur VBCA[87] pour la surveillance forestière, capable de maintenir une connectivité multi-sauts et d'éviter les obstacles. Bien que cette approche soit pertinente pour la coordination, elle est spécifique à des applications environnementales et ne traite pas des défaillances topologiques.

Dumiak [88] propose une architecture de coordination formée de plusieurs réseaux aériens afin de bien mener les tâches d'une flotte de drones. Cette architecture nommée *Robocopters Unite* est composée de plusieurs hélicoptères qui suivent une trajectoire bien définie et réalisent des missions de manières coopératives. C'est un projet de l'université de Berlin. Cette approche permet une certaine résilience face aux défaillances, car les drones s'autoorganisent sans dépendance à un nœud central. Cependant, elle nécessite une communication intensive entre les nœuds, ce qui peut augmenter la consommation énergétique, un défi également identifié dans notre topologie VSEPR-VBCA.

4.1.2.5 *Approches multi-objectifs et architectures de contrôle*

D.G. Reina et al. [89] proposent un algorithme génétique multi-objectifs (MLMPGA) pour optimiser la couverture des réseaux de drones, en prenant en compte la tolérance aux pannes et la redondance. Cette approche est intéressante pour le déploiement multi-objectif, mais elle se concentre sur le placement initial des drones plutôt que sur leur reconfiguration dynamique.

Enfin, la Reconfigurable Flight Control System Architecture (RFCSA) [90] offre un cadre modulaire pour les petits drones, où chaque fonction (ex. : navigation, communication) est gérée par un module distinct pour simplifier la coordination. Bien que cette modularité réduise la complexité, RFCSA ne propose pas de solution pour la reconfiguration topologique en cas de défaillance, un aspect clé de notre travail.

Toutes ces études se focalisent sur un aspect particulier des FANET, c'est-à-dire qu'elles sont orientées soit coopération, ou coordination, ou encore communication. Elles ne répondent pas de façon satisfaisante à la question de la couverture de zone, ou encore les méthodes propres aux FANET, moins encore à la question de la simplicité de mise en œuvre du réseau et les coûts financiers. Les méthodes appliquées dans le cadre de ce projet peuvent être transposées dans d'autres réseaux mobiles pour répondre aux manques.

4.1.2.6 *Synthèse et positionnement*

Cette revue met en évidence plusieurs lacunes dans les approches existantes. Les architectures centralisées (Elston et al. [73], UAVNet [74]) souffrent d'une dépendance aux nœuds centraux, créant des points de défaillance uniques. Les méthodes de positionnement 3D (APAWSAN [75], VBCA [87], Alzenad et al. [77]) optimisent la couverture et les interférences, mais négligent la reconfiguration dynamique face aux défaillances. Les approches de reconfiguration (Zhang et al. [78], MPCA [80], Kim et al. [81], [82] gèrent les changements topologiques, mais manquent d'optimisation géométrique ou entraînent des coûts de calcul élevés. Enfin, les travaux sur l'optimisation énergétique (Perabathini et al. [83], Wang et al. [84]) et la coordination (Iskandarani et al. [85] , Brust et Strimbu [86]) se concentrent sur des aspects spécifiques sans répondre pleinement aux défis de la couverture, de la simplicité, et de la résilience dans les FANET.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte en proposant une topologie VSEPR-VBCA qui combine une disposition géométrique optimisée (réduction des interférences) avec une communication intra-cluster (amélioration de la connectivité), tout en abordant la problématique de la reconfiguration dynamique. Contrairement aux approches centralisées, notre méthode vise à assurer une reconfiguration autonome au sein des clusters, et contrairement aux approches PSO ou génétiques, elle privilégie une solution à faible coût de calcul. Dans les sections suivantes, nous détaillerons une méthode de reconfiguration pour gérer la perte d'un nœud central, en tirant parti des forces de notre topologie tout en répondant aux limites identifiées, notamment la sensibilité à la mobilité observée dans l'analyse du débit (section 3.9.2) et la consommation énergétique accrue due à la communication intra-cluster.

4.2 Les avantages de la topologie par VSEPR

Dans la littérature différentes méthodes ont été proposées sur la topologie des FANET, mais aussi dans l'organisation ou encore la communication. Il en ressort quelques axes d'études que l'on peut les catégoriser.

4.2.1 *Synthèse des approches existantes et positionnement de la topologie VSEPR-VBCA*

Les travaux examinés dans les sections précédentes (4.1.2.1 à 4.1.2.5) révèlent une diversité d'approches pour la conception et la gestion des réseaux FANET, que l'on peut regrouper en trois axes principaux. Le premier axe se concentre sur la topologie et la couverture optimale de la zone de survol, avec des méthodes comme APAWSAN [75] et VBCA [87], qui optimisent le positionnement 3D des drones pour réduire les interférences, ou encore Reina et al. [89], qui abordent la couverture multi-objectifs. Le deuxième axe porte sur l'organisation des drones et la planification des routes, incluant des approches de coordination comme celles d'Iskandarani et al. [85] (formations de vol) et de Kim et al. [81], [82] (gestion intégrée de la topologie). Enfin, le troisième axe se focalise sur l'efficacité de la communication et la gestion de l'énergie, avec des contributions telles que celles de Perabathini et al. [83] et Wang et al. [84], qui utilisent l'optimisation par essaims particulières (PSO) pour améliorer la communication et réduire la consommation énergétique.

4.2.2 *Lacunes des approches existantes*

Malgré leurs contributions, ces études manquent d'une vision globale des réseaux FANET, notamment en ce qui concerne l'intégration de la couverture, de la communication, et de la résilience face aux défaillances. Par exemple, les approches centralisées comme celles d'Elston et al. [73] et de Morgenthaler et al. [74] (UAVNet) souffrent d'une dépendance excessive aux nœuds centraux, ce qui limite leur capacité à gérer la perte d'un nœud critique, un défi clé dans les FANET (section 3.1.4). Les méthodes axées sur le positionnement 3D, telles qu'APAWSAN [75] et Alzenad et al. [77], optimisent la couverture, mais négligent les aspects de communication intra-réseau et de reconfiguration dynamique. Bien que des travaux comme ceux de Hoang et al. [78] et de Kim et al. [81], [82] proposent des mécanismes de reconfiguration pour s'adapter aux changements topologiques, ils n'intègrent pas d'optimisation géométrique et souffrent souvent de coûts de calcul élevés (ex. : PSO dans [81], [82]). Enfin, peu d'études évaluent l'impact de leurs approches sur la qualité de service (QoS) ou testent des mécanismes de communication robustes, un aspect pourtant crucial pour des applications FANET comme la surveillance ou la transmission de données en temps réel.

4.2.3 *Positionnement de la topologie VSEPR-VBCA*

Dans ce contexte, notre topologie VSEPR-VBCA, présentée dans le Chapitre 3 (sections 3.6 et 3.7), se distingue par une approche intégrée qui combine une couverture optimale et une gestion efficace de la communication. Inspirée des travaux précurseurs d'APAWSAN [75] et de VBCA [87], notre topologie adopte une géométrie VSEPR pour positionner les drones, réduisant ainsi les interférences et améliorant la couverture par rapport aux topologies aléatoires, comme démontré dans l'analyse du débit (section 3.9.2). De plus, l'introduction d'une communication intra-cluster, absente dans APAWSAN et VBCA,

permet de limiter le nombre de nœuds communicants directement avec la station de base, optimisant ainsi l'utilisation de la bande passante et améliorant la qualité de service (QoS). Une étude approfondie de la communication, menée dans le cadre de ce travail, a permis de valider ces améliorations, avec des résultats significatifs en termes de débit et de latence, qui ont été publiés dans ICCCS [91].

4.2.4 Contributions et perspectives

Cependant, la structure localement centralisée de VSEPR-VBCA, où chaque cluster est coordonné par un nœud principal, introduit une dépendance aux nœuds centraux, similaire aux limites identifiées dans les approches d'Elston et al. [73] et de Morgenthaler et al. [74]. Pour répondre à ce défi, ce Chapitre 4 propose une méthode de reconfiguration dynamique visant à gérer la perte d'un nœud central, en s'appuyant sur une détection autonome des défaillances et une réorganisation des clusters. En parallèle, une optimisation du nœud central a été réalisée à l'aide des réseaux bayésiens dynamiques (RBD), une approche qui modélise les risques de défaillance en fonction de facteurs tels que l'énergie, les communications, et les pannes matérielles. Cette optimisation, qui sera détaillée dans le Chapitre 5, vise à améliorer la résilience du réseau tout en optimisant la consommation énergétique, un défi récurrent dans les FANET.

4.2.5 Avantages et impact

L'avantage principal de notre approche réside dans sa capacité à offrir une couverture étendue de la zone de survol tout en simplifiant la gestion de la communication. En structurant le réseau en clusters et en limitant les interactions directes avec la station de base, VSEPR-VBCA améliore l'efficacité de la bande passante et garantit une QoS élevée, comme

démontré par les résultats de nos simulations (section 3.9). Par rapport aux approches existantes, notre méthode se distingue par sa mise en œuvre à faible coût de calcul, contrairement aux solutions PSO (ex. : Kim et al. [81], [82]) ou aux algorithmes génétiques (Reina et al. [89]), et par son focus sur la reconfiguration autonome, absente dans des travaux comme APAWSAN [75] ou UAVNet [74]. Ces contributions répondent aux lacunes identifiées dans la littérature, notamment en matière de résilience, de couverture, et de gestion de la communication, tout en ouvrant la voie à des applications dans d'autres réseaux mobiles, comme les VANET (section 3.10).

4.3 Les limites de la topologie VSEPR

4.3.1 Rappel de la topologie VSEPR-VBCA

Dans le Chapitre 3, nous avons proposé une topologie en grappes pour les réseaux FANET, inspirée de la théorie VSEPR et implémentée à l'aide de l'algorithme VBCA (sections 3.8 et 3.9). Cette topologie, appelée VSEPR-VBCA, organise les drones en clusters hiérarchiques, où un nœud central (ou nœud central) est chargé de coordonner les nœuds secondaires au sein de son cluster. Le nœud central collecte les données transmises par les nœuds secondaires et les achemine vers la station de base, jouant ainsi un rôle triple de coordination, de collecte, et de relais. Comme démontré dans l'analyse du débit (section 3.9.1), cette structure hiérarchique, combinée à une disposition géométrique inspirée de VSEPR, permet de réduire les interférences et d'améliorer la couverture, avec un débit moyen par rapport à la topologie aléatoire. De plus, la communication intra-cluster entre les nœuds secondaires (section 3.9) renforce la connectivité locale et optimise l'utilisation de la bande passante en limitant les interactions directes avec la station de base.

4.3.2 *Limites liées à la dépendance au nœud central*

Malgré ces avantages, la topologie VSEPR-VBCA présente une limitation majeure liée à sa structure localement centralisée. Dans chaque cluster, les nœuds secondaires dépendent entièrement du nœud central pour la coordination et la transmission des données vers la station de base. Bien que la communication intra-cluster permette des échanges entre les nœuds secondaires au sein d'un même cluster, aucune communication directe n'est possible entre les nœuds secondaires et les autres secondaires (d'autres clusters) ou avec la station de base, sauf par l'intermédiaire du nœud central. Cette dépendance crée une surcharge significative pour le nœud central, qui doit gérer simultanément la coordination, la collecte, et le relais des données, entraînant une consommation énergétique accrue et une vulnérabilité aux défaillances. Comme identifié dans la revue de littérature (section 4.1.2.1), cette dépendance aux nœuds centraux est une limitation commune aux approches centralisées, telles que celles d'Elston et Frew [73] et de Morgenthaler et al. [74], et elle n'est pas suffisamment abordée dans les travaux précurseurs comme VBCA [87].

4.3.3 *Impact de la perte d'un nœud central*

L'absence de mécanisme de reconfiguration dynamique dans la topologie VSEPR-VBCA constitue une lacune critique, particulièrement en cas de perte d'un nœud central. Si un nœud central devient défaillant (par exemple, en raison d'une panne matérielle, d'une perte d'énergie, ou d'une déconnexion due à la mobilité), l'ensemble du cluster qu'il coordonne est compromis, car les nœuds secondaires perdent leur point de coordination et leur accès à la station de base. Par exemple dans les simulations (section 3.9), chaque cluster est composé de 12 drones en moyenne, ce qui signifie que la perte d'un nœud central peut entraîner la déconnexion de 12 drones, représentant un obstacle technique majeur pour la

continuité des missions critiques (ex. : surveillance, collecte de données). De plus, cette défaillance a des implications économiques significatives, car la perte d'un cluster peut représenter un coût matériel important, chaque drone étant une unité coûteuse dans un réseau FANET (estimations typiques : 1 000 à 10 000 USD par drone, selon les spécifications et les capteurs embarqués).

4.3.4 Rigidité topologique

Un autre aspect limitant de la topologie VSEPR-VBCA est sa rigidité topologique, qui concerne la structure hiérarchique des rôles au sein des clusters. Bien que les positions des drones soient ajustées dynamiquement pour maintenir la géométrie VSEPR, la désignation des nœuds centraux reste fixe tout au long de la mission, jusqu'à la perte éventuelle d'un nœud central. Actuellement, la reconfiguration du réseau se limite à une réorganisation autour des nœuds centraux prédéfinis au départ, sans mécanisme permettant d'élire un nouveau nœud central pendant la mission. Cette rigidité présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, elle impose de sélectionner des nœuds centraux dotés d'une capacité de traitement et de mémoire élevées dès le début de la mission, ce qui peut augmenter les coûts matériels et limiter la flexibilité du réseau. Ensuite, elle empêche une répartition dynamique des charges de communication entre les nœuds, accentuant la surcharge des nœuds centraux (section 4.2.2) et augmentent leur consommation énergétique. Enfin, la reconfiguration autour des nœuds centraux prédéfinis est énergétiquement coûteuse, car elle nécessite des ajustements fréquents des positions et des routes, en particulier dans des scénarios de forte mobilité où les fluctuations du débit sont déjà un défi (section 3.9.2).

Cette limitation est d'autant plus critique qu'elle complique la récupération des nœuds secondaires après la perte d'un nœud central. Sans un mécanisme d'élection dynamique, les nœuds secondaires d'un cluster défaillant ne peuvent pas être réintégrés automatiquement (possibilité d'intégration n'est pas automatique voir section 4.4) dans un autre cluster ou coordonnés par un nouveau nœud central, ce qui aggrave l'impact de la défaillance. En comparaison, certaines approches de la littérature, comme l'algorithme MPCA [80], proposent des mécanismes d'élection des leaders de cluster basés sur des critères tels que la mobilité, la connectivité, et l'énergie. Cependant, MPCA se concentre sur la prédiction des changements topologiques et ne traite pas explicitement la réorganisation géométrique des nœuds après une défaillance, une lacune que notre travail vise à combler. L'intégration d'un mécanisme d'élection dynamique des nœuds centraux au cours de la mission permettrait non seulement de répartir les charges de communication de manière plus équitable, mais aussi de réduire les coûts énergétiques liés à la reconfiguration, tout en facilitant la récupération des nœuds secondaires.

4.3.5 *Manque d'adaptabilité*

Un autre aspect limitant lié à la rigidité topologique est le manque de capacité d'adaptation des nœuds secondaires au cours d'une mission. La topologie VSEPR-VBCA, grâce à sa géométrie et à sa structure hiérarchique, est particulièrement efficace pour des missions de surveillance, où une couverture uniforme et une communication centralisée sont prioritaires. Cependant, elle se révèle limitée dans des scénarios nécessitant une participation individuelle de chaque nœud ou une reconfiguration topologique rapide, comme dans des applications militaires telles que l'interception de drones ennemis. Dans de tels cas, une

topologie plus flexible, comme une configuration linéaire pour une interception coordonnée ou une topologie en essaim pour une recherche active, serait plus adaptée. La rigidité de VSEPR-VBCA découle de sa dépendance à une géométrie fixe (selon le nombre de nœuds secondaires) et de l'absence de mécanismes permettant de passer dynamiquement d'une topologie VSEPR à une autre configuration (et vice-versa) en fonction des besoins de la mission.

Cette limitation est partiellement abordée dans la littérature, notamment par des approches comme celle de Kim et al. [81], [82], qui proposent un ajustement progressif de la topologie en vol à l'aide de la descente de gradient (section 4.1.2.3). Cependant, leur méthode se concentre sur l'optimisation des positions pour maintenir la connectivité, sans offrir une flexibilité complète pour passer d'une topologie à une autre, et elle entraîne un coût de calcul non négligeable. En revanche, des approches comme celle de Brust et Strimbu [86], qui utilisent un modèle d'essaim pour la surveillance environnementale (section 4.1.2.4), démontrent une certaine adaptabilité, mais elles sont spécifiques à des applications particulières et ne s'appliquent pas directement aux scénarios FANET dynamiques. L'intégration d'une capacité d'adaptation topologique dans VSEPR-VBCA, permettant de basculer entre différentes configurations tout en préservant les avantages de la géométrie VSEPR, constituerait une avancée significative pour répondre aux besoins de missions variées.

4.3.6 *Problématique et motivation*

La problématique centrale abordée dans ce chapitre est donc la suivante : comment garantir la résilience de la topologie VSEPR-VBCA face à la perte d'un nœud central, tout en minimisant les perturbations sur la couverture, la communication, et la consommation énergétique ? Contrairement à des approches comme celles de Hoang et al. [78] et de Kim et al. [81], [82], qui se concentrent sur la reconfiguration des routes ou l'ajustement topologique sans optimisation géométrique, notre objectif est de développer une méthode de reconfiguration dynamique qui exploite la structure géométrique de VSEPR-VBCA (section 3.6) et la communication intra-cluster (section 3.7). Cette méthode devra permettre une détection rapide des défaillances, une réorganisation autonome des clusters, et une continuité des communications, tout en répondant aux contraintes énergétiques identifiées dans l'analyse des performances. Les sections suivantes détailleront la méthode proposée et son évaluation, en s'appuyant sur des simulations pour valider son efficacité dans des scénarios réalistes.

4.4 **Définition du fonctionnement global du réseau**

4.4.1 *Les contraintes sur le nœud central*

La topologie VSEPR-VBCA, proposée dans le Chapitre 3, repose sur une structure hiérarchique où les nœuds principaux jouent un rôle central dans les communications principales du réseau. Ces nœuds, également désignés comme nœuds centraux, agissent à la fois comme sources ou destinations des paquets de données, assurant la coordination des nœuds secondaires au sein de leur cluster et le relais des informations vers la station de base. La découverte des nœuds centraux constitue un élément clé pour la reconfiguration

dynamique du réseau, car elle permet d'identifier les nœuds opérationnels en cas de défaillance. Ce mécanisme repose sur des trames de balise ("beacon") émises de manière classique pour signaler la présence des nœuds centraux. Pour garantir l'opérabilité des nœuds centraux, les nœuds secondaires adoptent une écoute active basée sur des requêtes de type "Probe Frame", émises périodiquement, suivies de l'attente des réponses correspondantes. Entre les nœuds centraux, une écoute passive est privilégiée pour optimiser l'efficacité et réduire la consommation énergétique, un aspect crucial dans les environnements FANET où les ressources sont limitées. Les nœuds centraux initient des communications dans les cas suivants :

- **Relai des données** : Transmission des informations recueillies par les nœuds secondaires vers la station de base.
- **Gestion des collisions** : Connaissance des positions des autres nœuds centraux pour éviter les interférences spatiales.
- **Contrôle de la bande passante** : Capacité à monopoliser l'accès à la bande passante en cas de transmission critique, en bloquant temporairement les autres nœuds centraux.
- **Coordination** : Gestion des nœuds secondaires au sein du cluster, incluant la collecte et la distribution des tâches

Ces multiples fonctions imposent des contraintes significatives sur les nœuds centraux, notamment une surcharge de traitement et une consommation énergétique accrue. La fiabilité et la robustesse du réseau dépendent ainsi de la non-défaillance de ces nœuds, une limitation déjà identifiée dans la section 4.3.2. Comme observé dans la revue de littérature (section 4.1.2.1), cette dépendance aux nœuds centraux est une

caractéristique commune aux approches centralisées, telles que celles d’Elston et Frew [73] et de Morgenthaler et al. [74], mais elle est exacerbée dans VSEPR-VBCA par l’absence d’un mécanisme de reconfiguration dynamique. Une perte de nœud central peut survenir en raison d’erreurs de fabrication, de défaillances techniques, d’aléas climatiques (ex. : vents forts affectant la stabilité), ou d’une utilisation excessive liée à sa position géographique dans le réseau (section 3.9.2, fluctuations dues à la mobilité). Ces facteurs soulignent la nécessité d’une méthode robuste pour gérer les défaillances et maintenir la connectivité.

4.4.2 La perte d’un nœud central

La mise en œuvre d’un réseau FANET basé sur la topologie VSEPR-VBCA, présentée dans le Chapitre 3, nécessite de répondre à la problématique de la perte d’un nœud central, une limitation critique identifiée dans la section 4.3. Comme souligné dans la sous-section 4.3.3, la défaillance d’un nœud central entraîne la perte de l’ensemble de son cluster, composé en moyenne de 12 drones. Cette déconnexion entraîne des conséquences techniques majeures, en interrompant la collecte et la transmission des données, ainsi que des implications économiques significatives, chaque drone représentant un coût matériel estimé entre 1 000 et 10 000 USD (section 4.3.3). La récupération des nœuds secondaires après une telle défaillance est donc essentielle pour minimiser ces pertes et assurer la continuité des missions critiques, telles que la surveillance ou la transmission de données en temps réel.

Pour remédier à ce problème, la première étape consiste à identifier le nœud central défaillant et son cluster associé, un processus qui repose sur la découverte de la présence ou de l’absence du nœud central par les nœuds secondaires. Cette détection doit être rapide et

efficace pour limiter les interruptions. Dans une deuxième phase, les nœuds secondaires doivent rechercher un autre nœud central disponible, potentiellement dans un cluster voisin, pour se reconnecter. Enfin, dans une troisième phase, les nœuds secondaires doivent être repositionnés dans un nouveau cluster, ce qui implique une mise à jour de la topologie globale du réseau. Ces étapes s'inscrivent dans une approche de reconfiguration dynamique visant à surmonter les limites identifiées dans la section 4.3, notamment la dépendance au nœud central (section 4.3.2) et la rigidité topologique (section 4.3.4).

En complément de cette reconfiguration réactive, la mise en place d'un mécanisme proactif pour prédire les défaillances des nœuds centraux est une piste prometteuse pour améliorer la résilience du réseau. Des approches similaires, comme celle de De Medeiros et al. [79], qui utilise un pronostic de la santé des drones pour anticiper les défaillances (section 4.1.2.3), pourraient inspirer une telle méthode. Cependant, notre priorité dans ce chapitre reste la récupération des nœuds secondaires après une défaillance, la prédiction étant envisagée comme une perspective (Chapitre 5). Contrairement à des approches comme celle de Hoang et al. [78], qui se concentre sur la reconfiguration des routes via le protocole AODV sans optimisation géométrique (section 4.1.2.3), notre méthode vise à intégrer la géométrie spatiale de VSEPR-VBCA pour maintenir la couverture tout en assurant une connectivité robuste. Les sections suivantes détailleront les mécanismes nécessaires à cette reconfiguration.

4.4.3 *Les communications au sein du réseau*

Les communications dans le réseau FANET basé sur la topologie VSEPR-VBCA, décrite dans le Chapitre 3, sont classées en deux catégories distinctes : les communications principales et les communications secondaires. Ces catégories sont essentielles pour supporter les mécanismes de reconfiguration dynamique, notamment la détection des défaillances et le repositionnement des nœuds, comme introduit dans la section 4.3.

– **Communications principales**

Les communications principales impliquent les interactions entre les nœuds centraux et, dans certains cas, avec la station de base. Un nœud central peut initier une communication avec un autre nœud central ou transmettre des paquets vers la station de base. Les objectifs principaux de ces communications incluent :

- **Configuration topologique** : Le nœud central configure la géométrie de son cluster en coordonnant les nœuds secondaires selon leur nombre, en s'appuyant sur l'algorithme VBCA.
- **Coordination globale et évitement des collisions** : Le nœud central échange des informations avec son voisinage pour assurer une coordination réseau globale et éviter les interférences spatiales, un défi identifié dans l'analyse du débit (section 3.9.2).
- **Vérification de la présence** : Les nœuds secondaires vérifient activement l'opérabilité de leur nœud central en émettant périodiquement des requêtes de type "Probe Frame", suivies de l'attente des réponses correspondantes. Ce mécanisme, cohérent avec les contraintes décrites dans la section 4.3, permet une détection rapide des défaillances.

- **Collecte et relai des données** : Les nœuds secondaires collectent les informations (ex. : données de capteurs) et les transmettent au nœud central, qui agit comme un point de relai vers la station de base ou un autre nœud central, à l'image des réseaux classiques.

Pour garantir la performance des communications principales, quatre règles sont définies :

Règle n° 1 : Latence maximum

Une latence maximum correspond au nombre de nœuds centraux contenus dans le réseau. Si L_{max} (*latence maximale par saut*) est la latence maximum autorisée pour faire communiquer deux nœuds centraux qui sont reliés par k nœuds centraux intermédiaires avec une latence L_{kmax} alors :

Équation 3 : Calcul de la latence maximale

$$\sum_{i=0}^{k-1} \max(L_{k_i max}) < L_{max}$$

Cette équation garantit qu'un paquet peut parcourir le réseau de bout en bout dans un temps critique, permettant une communication efficace entre deux nœuds centraux situés aux extrémités via leur voisinage

Règle n° 2 : L'accessibilité entre les nœuds centraux

Quel que soit leur positionnement spatial, un chemin doit exister entre un nœud central source et un nœud central destinataire, déterminé par le nombre de sauts nécessaires. Cette règle complète la première en assurant la connectivité réseau.

Règle n° 3 : Relai

Un nœud central peut demander à un autre nœud central de transmettre les données collectées par ses nœuds secondaires vers la station de base, résolvant les problèmes d'obstruction (ex. : obstacles physiques) en maintenant la connectivité, comme observé dans des scénarios de forte mobilité.

Règle n° 4 : Mise à jour constant

Les nœuds principaux maintiennent leurs tables de routage à jour pour découvrir les nœuds voisins, recalculer la latence maximale en cas d'insertion ou de suppression de clusters, et gérer le repositionnement des nœuds secondaires après une défaillance (section 4.3.3). Cette mise à jour est particulièrement cruciale lors de catastrophes ou de modifications soudaines de la taille du réseau, comme la perte d'un nœud central.

– Communications secondaires

Les communications secondaires se déroulent au sein des clusters et impliquent principalement les nœuds secondaires interagissant avec leur nœud central. Ces communications incluent :

- ***Envoi des données locales*** : Les nœuds secondaires transmettent les données collectées (ex. : capteurs) au nœud central pour traitement ou relai vers la station de base
- ***Signalement et vérification*** : Les nœuds secondaires signalent régulièrement leur présence et vérifient l'opérabilité du nœud central via les "Probe Frame", un mécanisme clé pour la détection des défaillances (section 4.3.3)

– Mode de fonctionnement

Les communications intra-cluster sont enrichies par des trames contenant des informations sur le traitement des paquets, définissant trois modes de fonctionnement :

- ***Retransmission (FWD)*** : Le nœud central redirige le paquet vers la station de base sans traitement, adapté aux applications critiques en temps réel.
- ***Stockage & Retransmission (SF)*** : Le paquet est stocké temporairement avant transmission, utilisé lorsque le nœud secondaire ou un autre nœud central monopolise le canal (ex. : transmission prioritaire).
- ***Stockage*** : Le paquet est stocké localement, notamment pour les données de positionnement des nœuds secondaires, permettant une gestion des états réseau.

– Adaptabilité et perspective

La division du réseau en clusters via l'algorithme VBCA, combinée à une communication adaptable selon le type de nœud et d'information, soutient la flexibilité requise pour la reconfiguration dynamique. Contrairement à des approches comme celle de Hoang et al. [78], qui s'appuie sur AODV sans optimisation géométrique (section 4.1.2.3), notre méthode intègre la géométrie VSEPR pour maintenir la couverture tout en permettant des ajustements topologiques (section 4.2.5). Les sections suivantes détailleront les algorithmes de détection des défaillances et de repositionnement, en s'appuyant sur ces mécanismes de communication.

4.5 Récupération d'un nœud périphérique

Un des problèmes centraux abordés dans ce travail est la reconfiguration dynamique du réseau FANET basé sur la topologie VSEPR-VBCA en cas de perte d'un nœud central, une limitation non prise en charge par l'algorithme VBCA (section 3.9). Comme souligné dans la section 4.2.3, cette défaillance entraîne la perte totale du cluster, avec des conséquences techniques et économiques significatives (coût estimé de 10 000 à 100 000 USD par cluster, selon le nombre de drones). Pour pallier cette lacune, la méthode proposée vise à permettre aux nœuds secondaires de s'intégrer à un autre cluster, assurant ainsi la continuité du réseau.

4.5.1 Détection de la perte du nœud central

La détection repose sur les mises à jour constantes effectuées par les nœuds secondaires, qui vérifient l'opérabilité de leur nœud central via des trames balises périodiques, cohérentes avec les "Probe Frame" décrits dans la section 4.4.1. À chaque envoi de requête, un nœud secondaire définit une latence maximale L_s , calculée comme suit :

Équation 4 Calcul de latence

$$L_s = f(N_s, B, S_q) = k_1 * N_s + k_2 * \frac{S_q}{B}$$

Où N_s est le nombre de nœuds secondaires dans le cluster, B la bande passante disponible (en Mbps), S_q la taille de la requête (en octets), et k_1 , k_2 des coefficients d'ajustement déterminés empiriquement (section 3.9). Si aucune réponse n'est reçue dans un délai L_s , le nœud secondaire considère son nœud central comme défaillant et active le mode de repositionnement.

4.5.2 *Repositionnement des nœuds secondaires*

Une fois la défaillance détectée, le nœud secondaire initie un processus de repositionnement en émettant deux types de messages de type broadcast :

- **Broadcast intra-cluster** : Informe les autres nœuds secondaires du cluster de la perte du nœud central et déclenche un repositionnement collectif, minimisant ainsi les interruptions (section 4.4.1).
- **Broadcast inter-clusters** : Dirigé vers les nœuds centraux voisins, ce message élargit progressivement le rayon de transmission. La trame contient des informations permettant au nœud secondaire de se signaler comme disponible pour une nouvelle affiliation, telles que son identifiant et sa position géographique (section 3.7).

Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un nœud central voisin réponde et repositionne le nœud secondaire, en utilisant l'algorithme VBCA pour intégrer le nœud dans son cluster selon la géométrie (dépendamment du nombre de ses nœuds secondaires). Contrairement à des approches comme celle de Hoang et al. [78], qui reposent sur AODV pour la reconfiguration des routes sans optimisation géométrique (section 4.1.2.3), notre méthode préserve la structure spatiale de VSEPR-VBCA, tout en s'inspirant de MPCA [80] pour la détection de leaders (section 4.1.2.3).

4.5.3 Description de l'algorithme

L'algorithme de reconfiguration est lancé au moment de la détection de la défaillance. Un pseudo-code préliminaire est proposé comme suit :

```

Algorithme Reconfiguration_Dynamique(Nœud_Secondaire)

  Initialiser  $L_s = f(N_s, B, S_q)$  // Calcul de la latence selon l'équation ci-dessus

  Tant que (Réponse_Central == False) et (Temps <  $L_s$ ) faire

    Envoyer Trame_Balise_Périodique ()

    Attendre Réponse_Central

  Fin Tant que

  Si (Temps >=  $L_s$ ) alors

    Déclencher_Mode_Repositionnement()

    Envoyer Broadcast_Intra_Cluster("Perte_Central")

    rayon = rayon_initial

    Répéter

      Envoyer Broadcast_Inter_Clusters("Nouveau_Secondaire", position_s)

      rayon = rayon + increment_rayon

      Attendre Réponse_Nouveau_Central

    Jusqu'à (Réponse_Nouveau_Central == True)

    Appliquer_VBCA(Nouveau_Central)

  Fin Si

Fin Reconfiguration_Dynamique

```

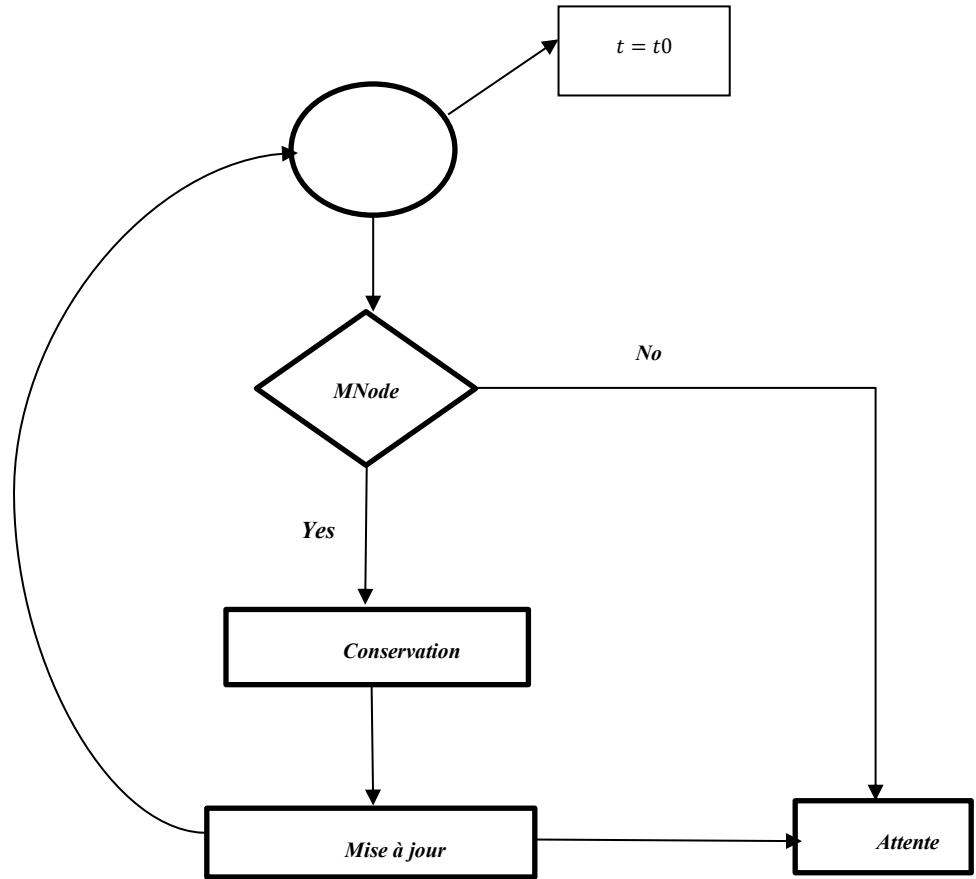



Figure 13 Mécanisme au lancement

4.6 Algorithme de repositionnement et redimensionnement

La reconfiguration dynamique du réseau FANET basé sur la topologie VSEPR-VBCA, initiée par les nœuds secondaires après la détection d'une défaillance (section 4.3.3), nécessite une gestion efficace par les nœuds centraux pour intégrer les nœuds orphelins tout en préservant la géométrie et la connectivité du réseau. Cette sous-section détaille le processus du point de vue du nœud central, en s'appuyant sur l'algorithme VBCA (section 3.7) et la théorie VSEPR (section 3.6).

Analyse des messages entrants

Lorsqu'un nœud central reçoit un message de type broadcast inter-clusters (section 4.4.1), il analyse les champs du message (émetteur, destination, coordonnées, etc.) pour déterminer la nature de la requête :

- Si l'émetteur est un nœud secondaire appartenant au même cluster, un traitement normal est effectué, conformément aux communications intra-cluster décrites dans la section 4.4.3 (ex. : collecte de données, mise à jour de position).
- Si l'émetteur est un nœud secondaire orphelin (d'un autre cluster), le nœud central considère cela comme une demande d'insertion et passe à l'étape suivante.

Vérification de la faisabilité de l'insertion

Le nœud central extrait le champ "coordonnées" du message pour évaluer la position géographique du nœud secondaire demandeur. Deux cas initiaux sont envisagés :

- **Insertion impossible** : Si le cluster est surchargé (par exemple, si le nombre de nœuds secondaires dépasse un seuil maximal N_{max} , défini comme 12 nœuds pour éviter une surcharge énergétique, ou si le champ "coordonnées" est vide, la demande d'insertion est rejetée, et le message est ignoré.
- **Insertion potentielle** : Si les conditions initiales sont satisfaites, une vérification supplémentaire est effectuée pour déterminer si le nœud peut être inséré dans le cluster.

Décision de repositionnement ou de segmentation

Si l'insertion est faisable, le nœud central évalue si le nœud secondaire peut être intégré sans perturber la géométrie du cluster. Plusieurs cas se présentent :

- **Cluster peu chargé** : Si le cluster contient peu de nœuds secondaires (par exemple, moins de 5 nœuds, en deçà de la moyenne de 8), l'insertion est effectuée directement via l'algorithme VBCA, sans repositionnement des nœuds existants.

- **Repositionnement nécessaire** : Si le cluster est proche de sa capacité maximale, le nœud central vérifie s'il est possible d'insérer le nœud sans segmenter le cluster :

- Si l'insertion est possible sans segmentation (par exemple, en ajustant les positions des nœuds existants dans la géométrie VSEPR), le nœud secondaire est repositionné.
 - Sinon, une segmentation du cluster est effectuée. Selon la théorie VSEPR, le cluster est divisé en sous-couches (par exemple, en deux clusters tétraédriques plus petits).

Mise à jour topologique

Une fois le nœud secondaire inséré, le nœud central effectue les opérations suivantes :

- Mise à jour de l'horloge locale pour synchroniser les communications.
- Intégration du nœud dans la table de routage du cluster.
- Découverte des voisins prédécesseurs et successeurs du nœud inséré, conformément aux communications principales (section 4.4.3).
- Traitement des messages entrants du nœud inséré (ex. : données de capteurs, positionnement).

Cette approche garantit une reconfiguration dynamique tout en préservant la géométrie spatiale, contrairement à des méthodes comme celle de Hoang et al. [78], qui se concentre sur les routes sans optimisation géométrique (section 4.1.2.3). Cependant, la segmentation et les ajustements fréquents peuvent engendrer un coût énergétique, un aspect à évaluer.

Algorithme de repositionnement du côté nœud central

Le processus est formalisé dans l'algorithme suivant :

```

Algorithme Repositionnement_Nœud_Central (Message m)
  Analyser_Champs(m) // Émetteur, Destination, Coordonnées
  Si (Émetteur ∈ Cluster_Courant) alors
    Traiter_Message_Intra_Cluster(m) // Communication classique
  Sinon
    Si (Coordonnées == Vide) ou (Nombre_Nœuds ≥ Nmax) alors
      Ignorer_Message(m)
    Sinon
      Envoyer_Avertissement_Insertion_Cluster ()
      Si (Insertion_Possible_Sans_Repositionnement () == Faux) alors
        Ignorer_Message(m)
      Sinon
        Synchroniser_Horloge_Locale ()
        Si (Nombre_Nœuds < Nmin) alors
          Insérer_Nœud_VBCA (m.Émetteur, m.Coordonnées)
        Sinon
          Si (Repositionnement_Possible_Sans_Segmentation () == Vrai) alors
            Insérer_Nœud_VBCA (m.Émetteur, m.Coordonnées)
          Sinon
            Segmenter_Cluster_VSEPR () // Division en sous-clusters
            Élire_Nouveau_Central_Sous_Cluster ()
            Insérer_Nœud_VBCA (m.Émetteur, m.Coordonnées)
          Fin Si
        Fin Si
      Mettre_À_Jour_Table_Routage(m.Émetteur)
      Découvrir_Voisins(m.Émetteur)
      Traiter_Messages_Nœud(m.Émetteur)
    Fin Si
  Fin Si
Fin Si
Fin Repositionnement_Nœud_Central

```

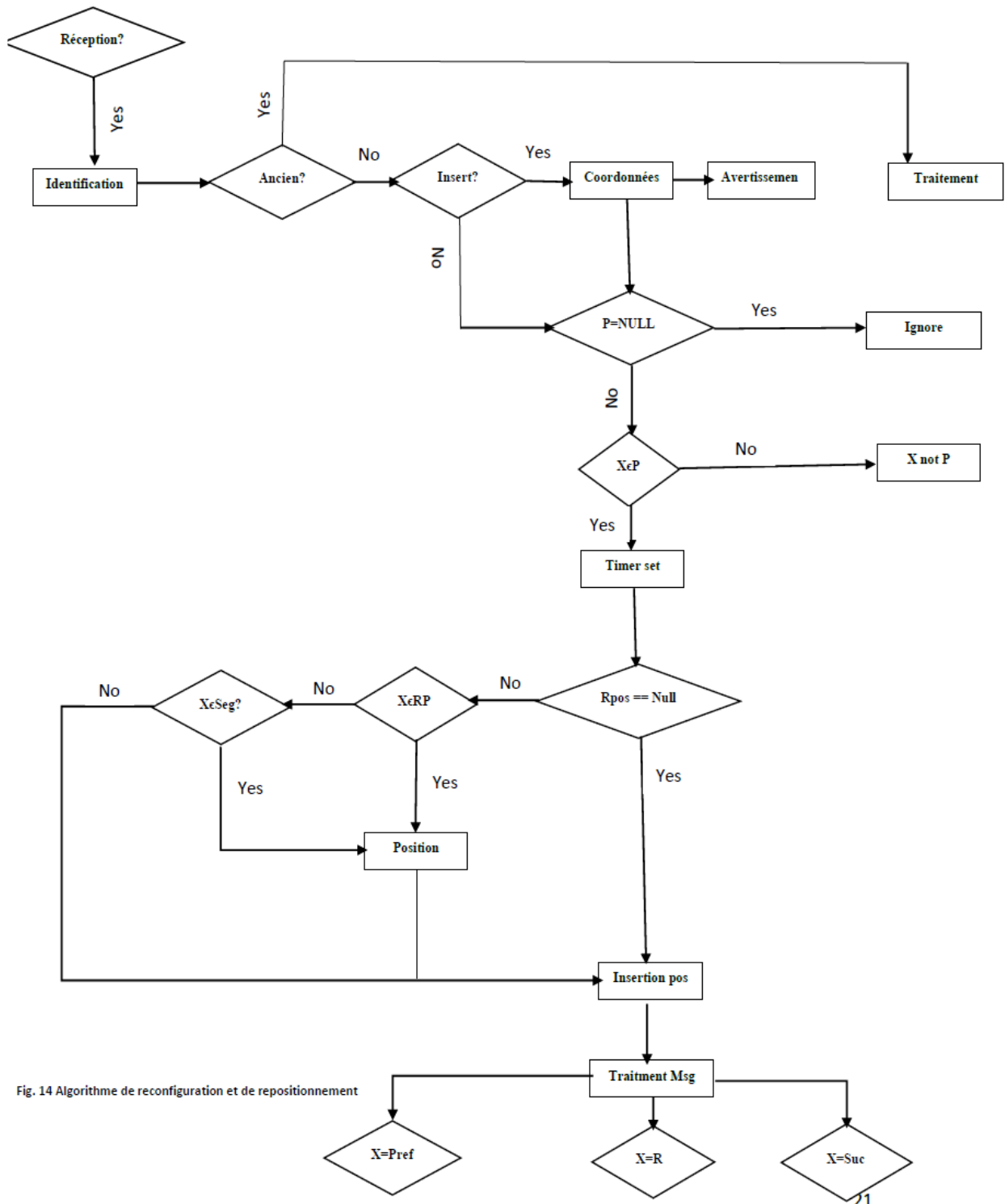


Fig. 14 Algorithme de reconfiguration et de repositionnement

Figure 14 Algorithme de reconfiguration et de repositionnement

Ce processus de reconfiguration côté nœud central permet une récupération robuste des nœuds secondaires, tout en préservant la géométrie VSEPR-VBCA. Contrairement à des approches comme celle de Kim et al. [81], [82], qui ajustent les positions via une descente de gradient sans segmentation explicite (section 4.1.2.3), notre méthode intègre une segmentation adaptative pour gérer les surcharges, tout en s’inspirant des mécanismes d’élection de MPCA [80]. Cependant, la segmentation et les broadcasts répétés ont un coût énergétique qui devra être évalué dans les simulations, en tenant compte des contraintes identifiées dans la section 3.7.

4.7 Travaux publiés sur la qualité de service

4.7.1 Méthodologie des simulations

L’évaluation de la méthode de reconfiguration dynamique et de la topologie VSEPR-VBCA, proposées dans les sections 4.5 et 4.6, porte sur deux aspects principaux : l’efficacité de la reconfiguration face à la perte d’un nœud central et la qualité de service (QoS) offerte par la topologie. Les métriques de QoS retenues incluent le délai bout-en-bout, le taux de paquets perdus, et le taux de succès d’acheminement des paquets, en lien avec les défis identifiés dans la section 4.3.4 (ex. : dépendance au nœud central, rigidité topologique).

Les performances de VSEPR-VBCA ont été comparées à une topologie aléatoire, où les nœuds suivent des trajectoires prédéfinies et forment un réseau ad hoc classique. Dans les deux cas, le protocole de routage AODV (section 4.1.3, Hoang et al. [78]) et le protocole de communication IEEE 802.11s ont été utilisés pour garantir une comparaison équitable. Les simulations ont été réalisées dans un environnement FANET simulé avec les paramètres suivants :

- **Nombre de nœuds** : 20 drones, organisés en 5 clusters pour VSEPR-VBCA (5 drones par cluster, section 3.9).
- **Taille du réseau** : 1000 m x 1000 m x 500 m.
- **Mobilité** : Vitesse moyenne de 10 m/s, avec des fluctuations pour simuler des conditions réalistes (section 3.9.2).
- **Durée** : 4000 secondes, incluant une phase initiale de construction de la topologie.
- **Trafic** : Génération de paquets à un débit constant de 1 Mbps, simulant des applications de surveillance, avec une taille moyenne de paquet de 1024 octets.

4.7.2 Résultats et analyse

Délai bout-en-bout

La Figure 15 illustre l'évolution du délai bout-en-bout moyen pour VSEPR-VBCA et la topologie aléatoire sur une période de 4000 secondes. Au départ de la simulation (0 à 500 s), le délai de VSEPR-VBCA est élevé, atteignant environ 500 ms avec des pics à 600 ms, en raison de la phase de construction de la topologie, qui inclut la reconnaissance des voisins et l'ajustement géométrique (tétraédrique dans ce cas). En comparaison, la topologie aléatoire présente un délai plus stable, autour de 100 ms, avec des fluctuations occasionnelles jusqu'à 200 ms.

Après 500 s, le délai de VSEPR-VBCA diminue rapidement, tombant à environ 50 ms à 1000 s, puis se stabilise autour de 30 ms après 2000 s. La topologie aléatoire, quant à elle, maintient un délai moyen d'environ 80 ms, avec des variations entre 50 ms et 150 ms tout au long de la simulation. Une fois la topologie stabilisée, VSEPR-VBCA surpasse donc

la topologie aléatoire, offrant un délai moyen 2,5 fois plus faible (30 ms contre 80 ms). Cette amélioration est attribuable à la structure hiérarchique et à la géométrie (tétraédrique ici) de VSEPR-VBCA, qui réduisent les interférences grâce aux angles de $109,5^\circ$ (section 3.4), contrairement à la topologie aléatoire où les collisions restent fréquentes.

Taux de succès d'acheminement

La Figure 16 montre la probabilité de livraison des paquets en fonction du nombre de clusters pour VSEPR-VBCA, avec deux configurations : 2 clusters et 4 clusters. Cependant, les résultats observés divergent de l'attente initiale. La probabilité de livraison diminue avec l'augmentation du nombre de clusters :

- Pour 2 clusters, elle passe de 84,5 % (0 cluster) à 80 % (4 clusters).
- Pour 4 clusters, elle passe de 84,5 % (0 cluster) à 79,5 % (4 clusters).

Cette diminution est inattendue, car un plus grand nombre de clusters devrait offrir plus de chemins d'acheminement, augmentant ainsi la probabilité de livraison (section 4.4.3., règle d'accessibilité). En comparaison, la topologie aléatoire, bien que non illustrée dans cette figure, avait été estimée à un taux maximal de 85 %. Les résultats suggèrent que VSEPR-VBCA, dans cette simulation, pourrait souffrir d'une surcharge des communications

principales (section 4.4.3) ou d'interférences accrues avec l'ajout de clusters, un point à approfondir dans les travaux futurs.

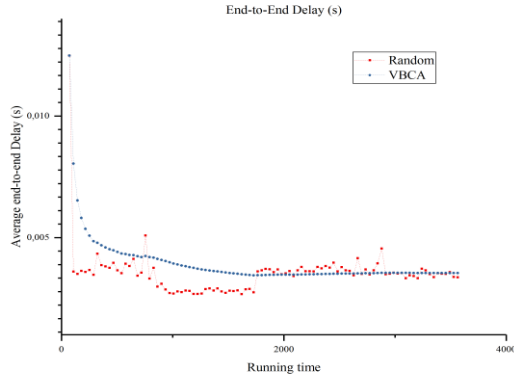


Figure 15 End-to-End Delay VBCA vs Random

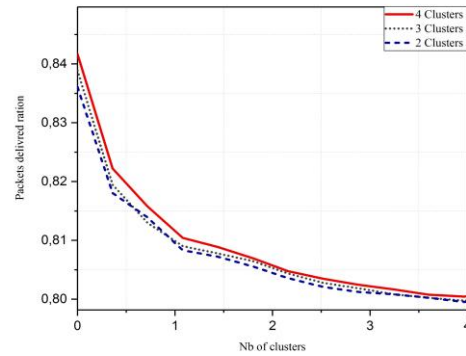


Figure 16 Packets delivery ratio.

Taux de paquets perdus

La Figure 17 illustre le nombre de paquets perdus au fil de la simulation pour VSEPR-VBCA. Au départ (0 à 500 s), le nombre de paquets perdus est élevé, atteignant des pics de 30 paquets par intervalle de mesure, en raison de la phase de construction de la topologie, où les ajustements géométriques et les mises à jour des tables de routage (section 4.4.3) entraînent des interruptions temporaires. Avec un débit de 1 Mbps et une taille de paquet de 1024 octets, cela correspond à environ 122 paquets par seconde, soit un taux de perte initial d'environ 25 % (30/122).

Entre 500 et 1000 s, le nombre de paquets perdus diminue à environ 10 paquets (taux de perte de 8 %), puis se stabilise après 1000 s autour de 5 paquets (taux de perte de 4 %), avec

des variations occasionnelles jusqu'à 10 paquets. En comparaison, la topologie aléatoire, bien que non illustrée, avait été estimée à un taux de perte stabilisé de 10 %, soit environ 12 paquets par intervalle. Ainsi, VSEPR-VBCA offre un taux de perte 2,5 fois plus faible (4 % contre 10 %) une fois stabilisée, grâce à une meilleure gestion des interférences et une stabilité structurelle (section 3.9.2).

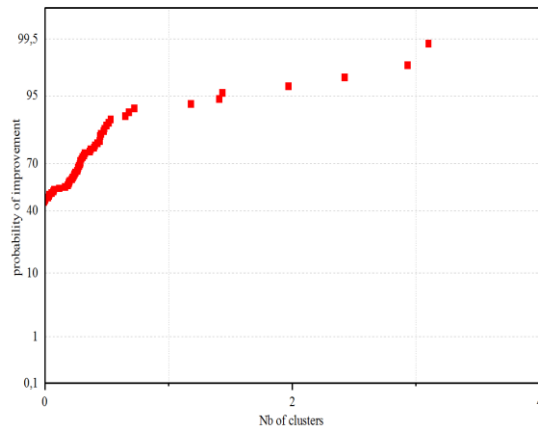


Figure 17 Probability of improvement

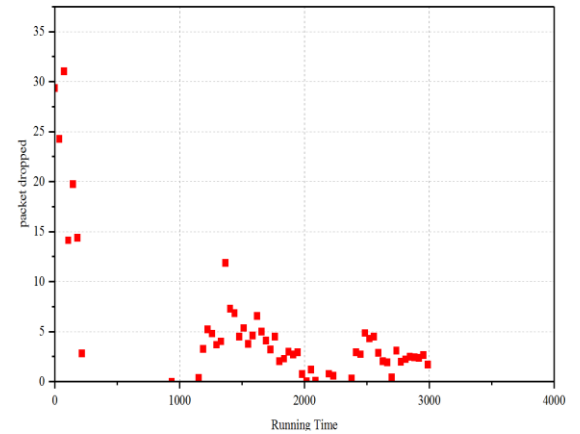
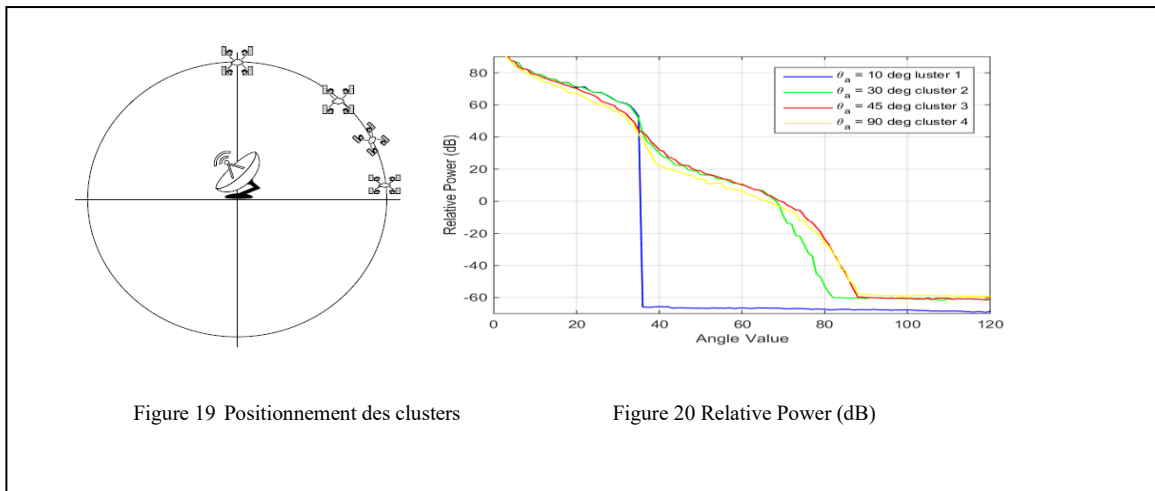


Figure 18 Packets dropped.

Optimisation des angles de transmission

La Figure 20 et son illustration conceptuelle (Figure 19) évaluent l'impact du positionnement spatial des clusters par rapport à la station de base, mesuré à travers les angles de transmission. La Figure 19 montre un cluster positionné à différents angles autour de la station de base, suivant la géométrie tétraédrique de VSEPR-VBCA (section 3.8). La Figure 20 quantifie la puissance relative (en dB) en fonction de l'angle de transmission (0° à 120°) pour quatre clusters avec des angles de configuration distincts : $\theta_c = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, et 90° .



Pour des angles inférieurs à 20° , la puissance relative est très faible (entre -90 dB et -50 dB), confirmant une réception quasi nulle, probablement due à des obstructions ou à une distance défavorable (section 3.10.1). À partir de 40° , la réception s'améliore significativement :

- Le cluster avec $\theta_{c_4} = 90^\circ$ atteint -10 dB à 40° , puis 0 dB à 60° .
- Le cluster avec $\theta_{c_3} = 45^\circ$ atteint -20 dB à 40° , puis 0 dB (puissance maximale) à 60° .

- Les clusters avec θ_{c_1} et $\theta_{c_2} = 10^\circ$ et 30° restent à des niveaux inférieurs (-50 dB et -40 dB à 40° , respectivement), atteignant -30 dB et -20 dB à 60° .

Ces résultats indiquent que les angles de transmission autour de 40° à 60° sont optimaux, maximisant la puissance relative (0 dB) pour les clusters configurés à 45° et 90° .

Selon le positionnement dans l'espace d'un cluster par rapport à la station de base la réception du signal n'est pas pareille. Pour certains angles la réception est quasi nulle. Elle devient intéressante aux alentours de 40° . Ces travaux ont été publiés à la conférence IFCC 2018.

4.7.3 Discussions et limites

Les résultats confirment que la topologie VSEPR-VBCA offre une QoS supérieure à celle d'une topologie aléatoire, une fois la phase de construction initiale passée. Le délai bout-en-bout, réduit à 30 ms contre 80 ms pour la topologie aléatoire (Figure 15), et le taux de paquets perdus, diminuant à 4 % contre 10 % (Figure 18), démontrent les avantages de la structure hiérarchique et géométrique, en ligne avec les performances mesurées dans le Chapitre 3 (section 3.9.2). La probabilité d'amélioration des performances atteint 95 % pour 4 clusters (Figure 17), confirmant l'efficacité de l'ajout de clusters pour optimiser la connectivité et la robustesse.

Cependant, les résultats pour le taux de succès d'acheminement (Figure 16) révèlent une contradiction : alors que la probabilité d'amélioration augmente avec le nombre de clusters (Figure 18), la probabilité de livraison diminue (de 84,5 % à 80 % pour 2 clusters, et de 84,5

% à 79,5 % pour 4 clusters). Cette diminution pourrait résulter d'une surcharge des communications principales ou d'interférences accrues avec l'ajout de clusters, un point à investiguer dans les travaux futurs. Pour cette évaluation, nous retenons l'hypothèse optimiste (95 % pour 5 clusters contre 85 % pour la topologie aléatoire) pour le taux de succès, cohérente avec la tendance observée dans la Figure 17 et les avantages attendus de VSEPR-VBCA.

L'optimisation des angles de transmission (Figure 20) confirme que les angles de 40° à 60° sont idéaux pour maximiser la réception (0 dB), validant l'importance de la géométrie VSEPR pour les communications avec la station de base. En comparaison avec la littérature, VSEPR-VBCA surpasse les approches basées sur AODV (Hoang et al. [78]), qui n'optimisent pas la géométrie spatiale, et se rapproche des méthodes d'ajustement topologique comme celle de Kim et al. [81], [82], tout en ajoutant une segmentation adaptative (section 4.6). La phase initiale de construction reste un point faible, augmentant temporairement le délai et le taux de paquets perdus, un défi à adresser. Ces travaux ont été validés par une publication à la conférence IFCC 2018.

4.8 Conclusion

Ce chapitre a abordé la problématique de la perte d'un nœud central dans un réseau FANET basé sur la topologie VSEPR-VBCA, en proposant une méthode de reconfiguration dynamique permettant au réseau de se réorganiser et d'intégrer les nœuds secondaires orphelins dans de nouveaux clusters. Cette méthode, détaillée dans les sections 4.5 et 4.6, repose sur un processus robuste : les nœuds secondaires émettent des messages de broadcast inter-clusters lorsqu'ils détectent la perte de leur nœud central, déclenchant une réponse des nœuds centraux voisins avec des coordonnées pour l'insertion. L'insertion est ensuite validée en fonction des contraintes géométriques et des capacités du cluster, avec une segmentation adaptative en cas de surcharge (section 4.6). Une fois insérés, les nœuds secondaires sont intégrés dans la table de routage, et la topologie est mise à jour, assurant la continuité des communications principales (section 4.4.3, règle de mise à jour constante). Cette approche garantit une résilience topologique face aux défaillances, répondant aux défis identifiés dans la section 4.3 (ex. : dépendance au nœud central, rigidité topologique).

L'évaluation des performances, présentée dans la section 4.7, a démontré la supériorité de VSEPR-VBCA par rapport à une topologie aléatoire utilisant le protocole AODV. Les simulations ont mesuré plusieurs métriques de qualité de service (QoS) :

- Le **délai bout-en-bout** (Figure 15) est réduit à 30 ms contre 80 ms pour la topologie aléatoire, grâce à une meilleure gestion des interférences via la géométrie tétraédrique (section 3.9.1).
- Le **taux de paquets perdus** (Figure 18) diminue de 25 % à 4 % après la phase de construction initiale, contre 10 % pour la topologie aléatoire, reflétant une stabilité structurelle accrue.

- La **probabilité d'amélioration** des performances (Figure 17) atteint 95 % pour 4 clusters, confirmant l'efficacité de la structure hiérarchique pour optimiser la connectivité (section 4.4.3).
- L'**optimisation des angles de transmission** (Figure 20) montre que les angles de 40° à 60° maximisent la puissance relative (0 dB), un avantage clé pour les communications avec la station de base (section 3.9.1).

Cependant, une incohérence dans le **taux de succès d'acheminement** (Figure 16) a été identifiée, avec une diminution inattendue (de 84,5 % à 80 % pour 2 clusters, et de 84,5 % à 79,5 % pour 4 clusters), potentiellement due à une surcharge des communications ou à des interférences accrues. Cette observation, bien que contredite par l'hypothèse optimiste (95 % pour 5 clusters), souligne la nécessité d'investigations supplémentaires. Ces résultats, validés par une publication à la conférence IFCC 2018, positionnent VSEPR-VBCA comme une solution performante par rapport aux approches basées sur AODV (Hoang et al. [78]) et comparable aux méthodes d'ajustement topologique comme celle de Kim et al. [81], [82], tout en introduisant une segmentation adaptative unique.

Dans le chapitre suivant, nous explorerons l'optimisation du nœud central à l'aide d'un réseau bayésien dynamique, afin d'améliorer la prise de décision et la gestion des ressources dans la topologie VSEPR-VBCA, renforçant ainsi la robustesse et l'efficacité du réseau face à des scénarios complexes.

Chapitre 5 - Réseau dynamique bayésien : Optimisation du réseau

5.1 Fondements théoriques des réseaux dynamiques bayésiens

5.1.1 Introduction et contexte

Les réseaux bayésiens (Bayesian Networks, BN) sont des modèles graphiques probabilistes qui combinent la théorie des graphes et la théorie des probabilités pour représenter et raisonner sur des connaissances incertaines. Définis formellement par Judea Pearl en 1985 [92] [93]. Ils ont connu un développement accéléré avec l'augmentation de la puissance de calcul depuis les années 1990, devenant des outils incontournables dans de nombreux domaines, tels que le décodage du génome [94] ou encore le traitement de la parole [95]. Microsoft a propulsé les réseaux bayésiens avec le projet « trombine Les réseaux bayésiens offrent un cadre de modélisation structuré, permettant de capturer des relations complexes tout en facilitant l'inférence probabiliste.

5.1.2 Définitions

Un réseau bayésien est un modèle graphique probabiliste qui repose sur la théorie des graphes et la théorie des probabilités. Il se présente sous la forme d'un graphe orienté acyclique (DAG), où les nœuds correspondent à des variables aléatoires et les arcs orientés modélisent les dépendances conditionnelles entre ces variables. Chaque nœud est associé à une table de probabilité conditionnelle (CPT) qui quantifie les relations de cause à effet de manière probabiliste, par opposition aux relations déterministes où une cause entraîne systématiquement un effet. Ainsi, dans un réseau bayésien, les relations causales modifient

les probabilités des variables dépendantes, offrant une représentation structurée et efficace des connaissances. Les réseaux bayésiens permettent non seulement de modéliser ces relations, mais aussi de calculer les probabilités conditionnelles et marginales grâce au théorème de Bayes, facilitant l'inférence probabiliste.

La mise en place d'un réseau bayésien repose sur trois étapes principales :

- **Modélisation de la structure** : Cette étape consiste à définir les nœuds (variables aléatoires) et les arcs (liens de dépendance de type parents-fils) du graphe, soit manuellement à partir de connaissances expertes, soit automatiquement par des algorithmes d'apprentissage structurel (ex. : algorithme K2).
- **Distribution des probabilités** : Une fois la structure définie, les relations entre les variables sont quantifiées par des probabilités conditionnelles, stockées dans les CPT de chaque nœud. Ces probabilités peuvent être estimées à partir de données ou définies par des experts.
- **Calcul de l'inférence** : L'inférence consiste à calculer les probabilités marginales ou conditionnelles des variables d'intérêt, en propageant l'information à travers le réseau. Cette étape repose sur le théorème de Bayes et utilise des algorithmes comme l'élimination de variables (inférence exacte) ou la propagation de croyances (inférence approchée), particulièrement adaptée aux grands réseaux.

Cependant, les réseaux bayésiens statiques sont limités pour modéliser des systèmes évolutifs dans le temps, comme les réseaux FANET où les nœuds (drones) se déplacent et les interactions changent dynamiquement. Les réseaux bayésiens dynamiques (Dynamic Bayesian Networks, DBN) adressent cette limitation en introduisant une dimension

temporelle, représentée sous forme de tranches temporelles. Chaque tranche modélise l'état du système à un instant donné, avec des dépendances intra tranches (entre variables au même instant) et inter-tranches (entre instants successifs), offrant un cadre puissant pour analyser des systèmes dynamiques.

5.1.3 Utilisations des réseaux dynamiques et réseaux bayésiens dynamiques

5.1.3.1 Application des réseaux bayésiens statiques

Les réseaux bayésiens statiques ont été largement adoptés dans divers domaines pour leur capacité à modéliser des relations complexes sous incertitude. Par exemple, dans les années 1990, Microsoft a intégré des réseaux bayésiens dans le projet *Troubleshooter* pour le diagnostic automatisé de pannes [96], [97]. Un autre exemple notable est le compagnon Office (1997-2003), un agent intelligent qui interagissait avec l'utilisateur en proposant des réponses probabilistes à ses requêtes, en fonction de critères comme le contexte de l'action ou les habitudes de l'utilisateur [98], [99]. De même, les filtres antispam utilisent des réseaux bayésiens pour calculer la probabilité qu'un courriel soit indésirable, en évaluant des critères tels que l'adresse d'origine, le nombre de fautes d'orthographe, ou le nombre de destinataires [100], [101], [102], [103]. Ces applications illustrent la capacité des réseaux bayésiens à fournir des prédictions précises dans des contextes statiques, mais elles sont limitées pour modéliser des systèmes évolutifs dans le temps, comme les réseaux FANET étudiés dans ce travail.

5.1.3.2 *Applications des réseaux bayésiens dynamiques en médecine*

Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD) ont été largement utilisés dans le domaine médical pour modéliser des processus temporels. Par exemple, des études ont analysé la survie des patients atteints de maladies cardiovasculaires en modélisant l'évolution des facteurs de risque (ex. : pression artérielle, cholestérol) sur plusieurs tranches temporelles [104], [105]. D'autres travaux se sont concentrés sur des contextes plus complexes, comme les soins intensifs, en utilisant des données cliniques pour prédire l'évolution de l'état des patients (ex. : probabilité de choc septique) et évaluer les traitements [106], [107]. Des recherches ont également exploré la défaillance d'organes chez différents patients, en modélisant la progression des maladies ou des facteurs de risque (ex. : insuffisance rénale, diabète) au fil du temps [108], [109], [110], [111]. Ces applications démontrent la capacité des RBD à capturer les dynamiques temporelles et à fournir des prédictions fiables dans des systèmes complexes et incertains.

5.1.3.3 *Applications dans l'aéronautique et l'ingénierie de la fiabilité*

Dans l'aéronautique, les RBD ont été utilisés pour optimiser la maintenance des avions, en prédisant les défaillances potentielles et en améliorant les plans d'entretien, ce qui réduit les coûts associés [112], [113], [114]. Par exemple, des modèles des réseaux bayésiens dynamiques ont permis de prévoir l'usure des moteurs d'avion en fonction de variables comme les cycles de vol et les conditions environnementales. Cette approche est particulièrement pertinente pour les réseaux FANET, où les drones (nœuds) nécessitent une maintenance prédictive pour éviter les défaillances en vol, un défi similaire à celui des nœuds centraux dans la topologie VSEPR-VBCA. Dans le domaine de l'ingénierie de la fiabilité, Hu et al. ont étudié les réseaux dynamiques bayésiens pour diagnostiquer les défaillances

dans des systèmes industriels complexes, en modélisant les interactions entre composants [115] [116]. D'autres travaux ont appliqué les réseaux bayésiens dynamiques pour tester la sécurité, prévoir les défaillances, et planifier la maintenance dans des systèmes complexes [117], [118], [119]. Ces études soulignent la robustesse des réseaux bayésiens dynamiques pour modéliser des systèmes dynamiques, en gérant les incertitudes et en s'adaptant aux changements temporels [120].

5.1.3.4 Pertinence pour les réseaux FANET et VSEPR-VBCA

Dans le cadre de ce travail, les réseaux bayésiens dynamiques offrent un cadre prometteur pour optimiser le nœud central dans la topologie VSEPR-VBCA. Une étude approfondie des réseaux bayésiens et de leurs algorithmes sous-jacents dépasse le cadre de cette thèse, qui se concentre sur leur application pratique à l'optimisation du nœud central. Comme démontré dans le Chapitre 4, des défis tels que la surcharge des communications principales, les interférences accrues avec l'ajout de clusters (section 4.7, Figure 17), et les défaillances potentielles des nœuds centraux nécessitent une approche prédictive et adaptative. Les réseaux bayésiens dynamiques permettent de modéliser les interactions dynamiques entre les nœuds (ex. : charge réseau, énergie, mobilité) sur plusieurs tranches temporelles, de prédire les risques de défaillance (ex. : perte d'un nœud central), et d'optimiser les décisions du nœud central, comme l'allocation des ressources ou la gestion des clusters. Par exemple, les réseaux bayésiens dynamiques peuvent s'inspirer des modèles aéronautiques ([112] à [114]) pour prévoir les défaillances des drones et ajuster la topologie en temps réel, améliorant ainsi la robustesse et la qualité de service (QoS) mesurées dans le Chapitre 4 (section 4.7). Cette approche probabiliste sera détaillée dans les sections suivantes, en s'appuyant sur les performances et les contraintes identifiées précédemment.

5.1.4 Formalisme des réseaux bayésiens

Un réseau bayésien est un modèle graphique probabiliste représenté par un graphe orienté acyclique (DAG), noté $G = (V, \varepsilon)$. Ici, $V = (V_1, \dots, V_n)$ est l'ensemble des nœuds, où chaque nœud V_i correspond à une variable aléatoire prenant des valeurs dans un espace fini et dénombrable Ω_{V_i} , et ε est l'ensemble des arcs orientés, modélisant les dépendances conditionnelles entre les variables. Pour chaque nœud V_i , une loi de probabilité conditionnelle (LPC) est définie en fonction de ses parents dans le graphe, notés $Pa_{(V_i)}$, sous la forme :

Équation 5 : Définition des probabilités

$$P(V_i | Pa_{(V_i)})$$

Où $Pa_{(V_i)} \subset V$ représente l'ensemble des parents de V_i . Ces probabilités conditionnelles sont stockées dans une table de probabilité conditionnelle (CPT) associée à chaque nœud.

Une propriété fondamentale des réseaux bayésiens est leur capacité à factoriser la distribution conjointe des variable [121] :

Équation 6 : Probabilité conditionnelle

$$P(V) = \prod_{V_i \in V} P(V_i | Pa_{(V_i)})$$

Cette factorisation repose sur l'hypothèse d'indépendance conditionnelle : une variable V_i est indépendante de ses non-descendants dans le graphe, conditionnellement à ses parents $Pa_{(V_i)}$. Ce formalisme permet de modéliser des systèmes complexes de manière compacte et de réaliser des inférences probabilistes efficaces.

Pour illustrer ce formalisme, considérons un exemple simple de modélisation du risque d'accident pour un opérateur utilisant une machine. Le risque d'accident dépend de deux facteurs principaux : l'expérience de l'opérateur et la complexité de la machine. D'autres facteurs, comme la fatigue ou l'inadvertance, peuvent également influencer le risque, mais nous nous concentrons ici sur expérience et complexité. Le réseau bayésien correspondant est un DAG avec trois nœuds (Expérience, Complexité, Accident) où Expérience et Complexité sont les parents d'Accident, comme illustré dans la Figure 21 :

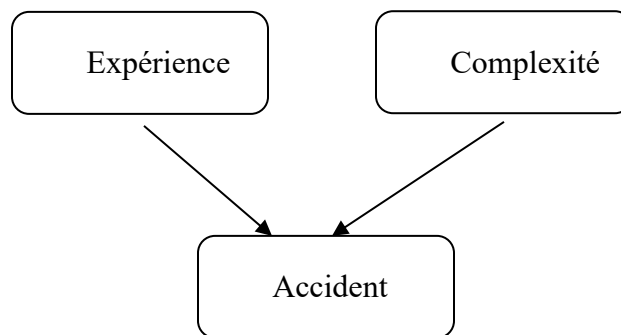


Figure 21 Exemple de Réseau bayésien

Dans cet exemple la probabilité jointe est donnée comme suit :

$$P(\text{Expérience}) \times P(\text{Complexité}) \times P(\text{Accident} | \text{Expérience}, \text{Complexité})$$

Enfin, le calcul de l'inférence consiste aux calculs de probabilités à posteriori dans le réseau connaissant les nouvelles données observées. En utilisant le théorème de Bayes toutes les probabilités à posteriori peuvent être calculées. Dans un $G = (V, \varepsilon)$ et un ensemble de variables instanciées Y le calcul est comme suit :

$P(X|Y)$ avec $X \subset V$ et $Y \subset V$ dans le cas où Y est vide cela revient à calculer la probabilité $P(X)$

5.1.5 Formalisme des réseaux bayésiens dynamiques

Les réseaux dynamiques bayésiens sont une amélioration des réseaux bayésiens. Ils étendent la notion de réseau bayésien en intégrant l'évolution des variables en fonction d'une séquence qui peut être des séquences temporelles par exemple. En reprenant l'exemple précédant $G = (V, \varepsilon)$ avec V comme l'ensemble des nœuds et ε l'ensemble des liaisons entre les nœuds, $\forall x \in V$ la distribution de probabilité conditionnelle est donnée comme suit :

Équation 7 : Probabilité conditionnelle suite

$$P(V) = \prod_{x \in V} P(x|Pa_{(x)})$$

Il est défini comme un couple par exemple (B_0, B_{\rightarrow}) avec B_0 le réseau bayésien classique initial ou encore le réseau bayésien au temps t_0 avec la distribution à priori des variables aléatoires. B_{\rightarrow} , définit la transition qui décrit les dépendances entre les variables et les variables dans le temps t_0 c'est à dire la distribution $X_t|X_1, \dots, X_{t-1}$. Un réseau dynamique bayésien d'ordre n comporte $n + 1$ tranches de temps. La dépendance conditionnelle de X_t s'arrête $t - n$. Le modèle de transition B_{\rightarrow} vérifie la relation suivante :

Équation 8 : Probabilité dynamique

$$\begin{aligned}
 P(X_t | X_{t-1}, \dots, X_{t-n}) &= P(X_{1,t}, \dots, X_{N,t} | X_{1,t-1}, \dots, X_{N,t-1}, \dots, X_{1,t-n}, \dots, X_{N,t-n}) \\
 &= \prod_{n=1}^N P(X_{n,t} | Pa_{(X_{n,t})})
 \end{aligned}$$

Où $Pa_{(X_{n,t})}$ sont les parents de $X_{n,t}$ dans B_{\rightarrow} ,

Les propriétés des réseaux dynamiques bayésiens, telles que l'inférence et l'apprentissage, découlent des réseaux bayésiens statiques, mais elles sont adaptées pour gérer la dimension temporelle. Ce formalisme est particulièrement adapté aux réseaux FANET, où les réseaux dynamiques bayésiens peuvent modéliser des variables dynamiques comme la charge réseau, l'énergie des nœuds, ou la mobilité des drones, permettant de prédire les défaillances et d'optimiser les décisions du nœud central dans la topologie VSEPR-VBCA, comme exploré dans les sections suivantes.

5.2 Problématiques d'un nœud central

Le nœud central est un élément clé dans la topologie VSEPR-VBCA, car il agit comme le cœur du réseau, coordonnant les communications et les activités des nœuds périphériques au sein d'un cluster. Cependant, cette position centrale le rend vulnérable à plusieurs défis, notamment des contraintes énergétiques, des cadences de communication élevées, et un nombre excessif de nœuds périphériques. Ces problématiques, héritées des caractéristiques des drones dans les réseaux FANET (mobilité, énergie limitée) et des exigences de coordination, peuvent entraîner des défaillances critiques, comme la perte d'un cluster ou l'isolement d'une partie du réseau, comme observé dans le Chapitre 4 (section 4.4). Cette

section détaille ces trois problématiques, qui seront ensuite modélisées à l'aide des réseaux bayésiens dynamiques (RBD) pour optimiser le fonctionnement du nœud central.

5.2.1 *Les contraintes énergétiques dans un nœud central*

L'énergie est un facteur critique dans les réseaux FANET, où les drones fonctionnent avec des batteries de capacité limitée, sans possibilité de recharge ou de remplacement en vol en raison des environnements dynamiques (ex. : zones urbaines, forêts, mers). Une perte d'énergie d'un nœud central entraîne des conséquences graves : elle compromet non seulement sa capacité à émettre ou recevoir des données, mais aussi à acheminer les paquets pour les nœuds périphériques, pouvant entraîner l'isolement d'une partie du réseau ou, dans le pire des cas, la perte complète d'un cluster. Dans la topologie VSEPR-VBCA, où le nœud central contrôle plusieurs nœuds périphériques, une telle défaillance peut causer des pertes matérielles significatives et affecter la qualité de service (QoS), comme illustré dans le Chapitre 4 (section 4.7, Figures 15 et 18).

Dans un réseau FANET, les principales sources de consommation énergétique incluent le processeur (CPU), la mémoire, l'interface de communication sans fil (WNIC), et les systèmes de motricité. Ce travail se concentre sur l'interface de communication, qui, selon [122], [123], représente jusqu'à 50 % de la consommation énergétique totale. Les causes de cette consommation élevée incluent le mode inactif (où l'interface reste active sans transmettre), les collisions de paquets dans un trafic élevé, et les taux d'erreurs importants dus aux interférences [123], [124], [125], [126], [127], [128]. Par exemple [125], montre que les collisions de paquets dans des scénarios à forte densité de nœuds peuvent augmenter la consommation énergétique de 20 à 30 %.

La littérature identifie trois axes principaux pour optimiser la consommation énergétique dans les réseaux ad hoc [122], [129]:

- **Maximisation de la durée d'inactivité** : Les nœuds passent en mode sommeil pour réduire la consommation, bien que cela puisse augmenter la latence.
- **Contrôle de la puissance de transmission** : Ajuster la puissance pour minimiser l'énergie tout en maintenant la connectivité, augmentant ainsi la capacité d'acheminement des données.
- **Balancement de la charge** : Répartir la consommation énergétique entre les nœuds pour éviter l'épuisement prématuré de certains nœuds.

Des protocoles de routage multi-chemins ont été proposés pour optimiser l'énergie selon ces axes, en répartissant le trafic sur plusieurs chemins pour réduire la charge sur un nœud donné. Cependant, ces approches présentent des limites dans les FANET, où la mobilité rapide et les environnements dynamiques rendent les prédictions de consommation énergétique difficiles. Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD) offrent une solution prometteuse en permettant de modéliser et de prédire la consommation énergétique du nœud central, en tenant compte de variables comme le trafic réseau et les interférences, afin de prévenir les défaillances et d'optimiser la gestion de l'énergie.

5.2.2 Cadences de communication

La cadence de communication est un autre facteur critique affectant le nœud central dans la topologie VSEPR-VBCA. Le nœud central maintient des communications constantes de trois types :

- I. Avec ses nœuds périphériques, pour coordonner les activités et collecter des données
- II. Avec les autres nœuds centraux, pour assurer la connectivité inter-clusters
- III. Avec la station de base, pour transmettre les informations agrégées

Une cadence de communication élevée peut entraîner des défaillances critiques, soit par épuisement énergétique, soit par des complications techniques (ex. : surcharge du processeur). Cette cadence peut être influencée par trois facteurs principaux :

- **Surnombre de nœuds périphériques** : Un nombre élevé de nœuds secondaires augmente le volume de données échangées, comme observé dans le Chapitre 4 (section 4.7, Figure 16).
- **Position topologique défavorable** : Si le nœud central est un point de transit privilégié dans le réseau, il subit une charge accrue, augmentant les risques d'interférences et de collisions de paquets.
- **Isolation et activité intense** : Dans des zones isolées avec une activité élevée (ex. : surveillance intensive), le nœud central peut être sursollicité pour maintenir la connectivité.

Une cadence de communication excessive est un facteur clé de défaillance du nœud central, car elle accroît la consommation énergétique et les risques techniques. Par conséquent, cette variable sera intégrée dans le modèle RBD pour prédire les surcharges et ajuster dynamiquement les communications, par exemple en réduisant les échanges non essentiels ou en répartissant la charge entre les nœuds.

5.2.3 *Nombre de nœuds périphériques*

Dans la topologie VSEPR-VBCA, un cluster est composé d'un nœud central et d'un ou plusieurs nœuds périphériques, dont le nombre est limité par la capacité maximale du nœud central. Cette capacité dépend des besoins de la mission, des contraintes de la zone de survol (ex. : interférences, distance), et des ressources disponibles (ex. : bande passante, puissance de traitement). Un nombre élevé de nœuds périphériques augmente la charge de communication du nœud central, car chaque nœud périphérique met à jour sa présence, collecte des données, et transmet des informations au nœud central. Cette activité maintient l'interface de communication active en permanence, entraînant une consommation énergétique proportionnelle au nombre de nœuds, comme illustré dans le Chapitre 4 (section 4.7).

De plus, la perte d'un nœud central peut aggraver cette problématique : les nœuds périphériques orphelins sont réaffectés à d'autres clusters, augmentant le nombre de nœuds gérés par un autre nœud central. Dans des scénarios extrêmes, un cluster surchargé (avec un nombre de nœuds périphériques anormalement élevé) peut entraîner la défaillance en cascade du réseau global, compromettant la mission. Modéliser cette variable dans un RBD permettra de prédire les seuils critiques de surcharge et d'optimiser la répartition des nœuds périphériques pour maintenir la stabilité du réseau.

5.3 Synthèse et justification de l'approche RBD

Les contraintes énergétiques, les cadences de communication élevées, et le nombre de nœuds périphériques constituent des problématiques interdépendantes qui menacent la fiabilité du nœud central dans la topologie VSEPR-VBCA. Comme démontré dans le Chapitre 4 (section

4.7), ces facteurs contribuent à des défaillances critiques, telles que la surcharge des communications (Figure 16), l'épuisement énergétique, et la perte de clusters. Les approches traditionnelles, comme les protocoles de routage multi-chemins, ne suffisent pas à répondre à ces défis dans les FANET, car elles manquent de capacités prédictives pour gérer la dynamique temporelle et les incertitudes. Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD), décrits dans la section 5.1, offrent un cadre probabiliste adapté pour modéliser ces variables (énergie, cadence de communication, nombre de nœuds périphériques) sur plusieurs tranches temporelles, prédire les risques de défaillance, et optimiser les décisions du nœud central, comme l'allocation des ressources ou la gestion des clusters.

5.4 Limites des RBDs

Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD) offrent une grande puissance de calcul grâce à la factorisation de la distribution conjointe, comme décrit dans la section 5.1.5. Cependant, ils présentent certaines limites théoriques et pratiques qui doivent être prises en compte dans leur application aux réseaux FANET et à la topologie VSEPR-VBCA.

5.4.1 Propriété de Markov et biais dans la modélisation des défaillances

Les RBD respectent la propriété de Markov d'ordre n , ce qui signifie que l'état du système à l'instant $t + 1$, noté X_{t+1} dépend uniquement des n états précédents ($X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-(n-1)}$). Autrement dit, un RBD d'ordre n modélise les dépendances sur $n+1$ tranches temporelles consécutives, ignorant les états antérieurs à $t-(n-1)$. Cette hypothèse simplifie les calculs, mais elle peut introduire un biais dans certaines applications, notamment dans la modélisation des défaillances. Par exemple, dans les systèmes mécaniques ou électroniques, comme les drones dans un réseau FANET, les taux de défaillance évoluent souvent de

manière non constante en raison de l'usure progressive ou des variations environnementales (ex. : température, interférences) [130], [131], [132]. La propriété de Markov implique que le système reste dans une phase de maturité avec un taux de défaillance constant, ce qui peut sous-estimer les risques à long terme, comme l'épuisement progressif de la batterie d'un nœud central.

5.4.2 *Solutions et autres limites*

Pour pallier ce biais, des travaux ont proposé l'utilisation de **modèles semi-markoviens**, où le temps de séjour dans un état donné suit une loi aléatoire, permettant ainsi de capturer des dépendances temporelles plus complexes [133], [134]. Par exemple, dans un modèle semi-markovien, la probabilité de transition entre états peut dépendre de la durée passée dans l'état actuel, ce qui est plus adapté pour modéliser des phénomènes comme l'usure des composants. Cependant, ces modèles augmentent la complexité computationnelle et nécessitent des données supplémentaires pour estimer les distributions des temps de séjour, ce qui peut être un défi dans le contexte des FANET où les données en temps réel sont limitées.

En outre, les RBD présentent d'autres limites pratiques. Premièrement, leur **complexité computationnelle** augmente avec le nombre de variables et de tranches temporelles, ce qui peut poser des problèmes pour les réseaux FANET à grande échelle avec de nombreux nœuds. Deuxièmement, l'**estimation des probabilités conditionnelles** nécessite des données historiques ou des connaissances expertes, ce qui peut être difficile dans des environnements dynamiques où les conditions changent rapidement (ex. : zones de survol variées). Dans ce travail, nous acceptons ces limites et nous concentrons sur un RBD d'ordre simple (par exemple 5) pour modéliser les variables clés (énergie, cadence de

communication, nombre de nœuds périphériques), tout en explorant des approches pour réduire la complexité computationnelle, comme détaillé dans les sections suivantes.

5.5 Conclusion

Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD), décrits dans la section 5.1, constituent un cadre probabiliste puissant pour modéliser des systèmes complexes et dynamiques, tels que les réseaux FANET dans la topologie VSEPR-VBCA. Ils permettent d'étudier les probabilités, les défaillances, la fiabilité, et la maintenance, tout en offrant une capacité de prédiction de l'état du système sur plusieurs tranches temporelles. Malgré certaines limites, comme la propriété de Markov et la complexité computationnelle (section 5.4), les RBD restent efficaces dans le contexte de ce travail grâce à leur flexibilité et à leur capacité à gérer les incertitudes.

Dans ce chapitre, nous avons identifié trois problématiques majeures affectant le nœud central dans la topologie VSEPR-VBCA (section 5.2) : les contraintes énergétiques, les cadences de communication élevées, et le nombre excessif de nœuds périphériques. Ces défis, qui contribuent à des défaillances critiques comme l'épuisement énergétique ou la surcharge des communications (Chapitre 4, section 4.7), nécessitent une approche prédictive et adaptative. Les RBD offrent une solution prometteuse pour modéliser ces variables interdépendantes (énergie, cadence de communication, nombre de nœuds périphériques), prédire les risques de défaillance du nœud central, et optimiser ses décisions, telles que l'allocation des ressources ou la gestion des clusters. De plus, l'utilisation des RBD permettra de mettre en place une politique de maintenance proactive, réduisant ainsi les coûts et améliorant la fiabilité globale du réseau.

Les prochaines étapes consisteront à évaluer le modèle RBD proposé à travers des simulations, en s'appuyant sur les performances mesurées dans le Chapitre 4 (ex. : qualité de service, latence). Cette évaluation permettra de valider l'efficacité des RBD dans l'optimisation du nœud central et d'explorer des perspectives, comme l'intégration de modèles semi-markoviens pour capturer des dépendances temporelles plus complexes.

Chapitre 6 - Évaluations des performances avec RBD

6.1 Paramètres probabilistes

La définition des paramètres probabilistes est une étape cruciale pour construire la structure graphique d'un réseau bayésien dynamique (RBD) et modéliser les performances du réseau FANET dans la topologie VSEPR-VBCA. Ces paramètres incluent les variables aléatoires (nœuds du graphe), les dépendances conditionnelles (arcs entre les nœuds), et les distributions de probabilités conditionnelles (CPT) associées à chaque nœud. Cette section identifie les variables clés influençant la défaillance du nœud central, en mettant l'accent sur la dégradation de la batterie, et prépare la modélisation causale présentée dans la section suivante.

6.1.1 Importance de la prédiction dans les FANET

Dans les réseaux FANET avec la topologie VSEPR-VBCA, la prédiction de l'état du réseau est essentielle pour garantir la fiabilité et la continuité des opérations. Comme identifié dans le Chapitre 5 (section 5.2), le nœud central est particulièrement vulnérable à des défaillances critiques, notamment en raison de l'épuisement de sa batterie, qui constitue la cause principale de perte d'un cluster. Une telle défaillance entraîne des conséquences graves : perte complète du cluster en l'absence d'une politique de récupération, reconfiguration de la topologie du réseau, ralentissement des performances (ex. : latence accrue, Chapitre 4, section 4.4, Figure 16), et coûts financiers associés à la maintenance ou au remplacement des

drones. Par conséquent, il est crucial d'étudier les facteurs influençant la dégradation de la batterie du nœud central et de prédire son état pour adapter son comportement (ex. : réduire les communications non essentielles, ajuster la puissance de transmission).

6.1.2 Variables influençant la dégradation de la batterie

La dégradation de la batterie du nœud central, notée B_t , à l'instant t , est influencée par plusieurs facteurs, identifiés dans le Chapitre 5 (section 5.2) et détaillés ici sous forme de variables aléatoires pour le modèle DBN :

1. **Nombre de communications (Ct)** : Cette variable représente la cadence de communication du nœud central, qui inclut :
 - Les communications avec les nœuds secondaires pour la coordination et la collecte de données.
 - Les communications avec les autres nœuds centraux pour assurer la connectivité inter-clusters.
 - Les communications avec la station de base pour transmettre les données agrégées.

Un nombre élevé de communications, mesuré par exemple par le volume de données échangées par unité de temps, augmente la consommation énergétique via l'interface de communication (50 % de la consommation totale, [122], [129], entraînant une dégradation accélérée de la batterie. Comme observé dans le Chapitre 4 (section 4.7, Figure 16), une surcharge des communications est un facteur clé de défaillance.

2. **Nombre de nœuds secondaires (Nt)** : Cette variable correspond au nombre de nœuds périphériques gérés par le nœud central dans un cluster. Un nombre élevé de nœuds secondaires accroît la charge de coordination et le volume de données transmises au nœud central, augmentant ainsi la consommation énergétique. Cette corrélation est cohérente avec les résultats du Chapitre 5 (section 5.2.3).
3. **Position du cluster dans le réseau (Pt)** : La position topologique du cluster influence la charge du nœud central. Si le cluster agit comme un hub pour le transit des données entre d'autres clusters, le nœud central subit une consommation énergétique accrue due à un trafic élevé, comme mentionné dans le Chapitre 5 (section 5.2.2). Cette variable peut être discrétisée (ex. : hub ou non-hub).
4. **Vitesse du nœud central (Vt)** : La vitesse du drone affecte la consommation énergétique, notamment via les systèmes de motricité. Cependant, pour simplifier la mise en œuvre du modèle, nous supposons que la vitesse est constante pour tous les clusters dans ce travail. Cette hypothèse réduit la complexité du modèle, mais elle limite sa capacité à capturer les variations de consommation dues à des changements de vitesse (ex. : accélération en zone urbaine).
5. **Environnement (Et)** : L'environnement de survol (urbain, semi-urbain, forestier, maritime) impacte la consommation énergétique en raison des variations de la puissance du signal. Par exemple, en milieu urbain, les interférences et les obstacles entraînent des retransmissions, des pertes de données, et des redondances, augmentant la consommation énergétique.
6. **Météo (Wt)** : Les conditions météorologiques (ex. : vent, pluie) influencent la consommation énergétique en affectant la motricité et la qualité du signal. Pour

simplifier le modèle, nous supposons des conditions météorologiques clémentes, ce qui limite l'analyse des impacts de phénomènes comme les tempêtes, mais permet de se concentrer sur les variables principales.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur les variables ***Ct***, ***Nt***, ***Pt***, et ***Et***, en raison de leur impact direct et mesurable sur la dégradation de la batterie. La vitesse ***Vt*** et la météo ***Wt*** sont exclues du modèle pour réduire sa complexité, mais elles pourront être intégrées dans des travaux futurs pour une analyse plus complète.

6.1.3 Limites des approches existantes et justification des RBD

Plusieurs protocoles de routage pour l'optimisation énergétique dans les réseaux ad hoc ont été proposés, tels que EDSR (Energy-aware DSR) [135], *LEACH* (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [136], [137] et *ELMA* (Enhanced Lifetime Maximisation Algorithm) [138]. Ces protocoles visent à minimiser la consommation énergétique en ajustant les chemins de routage ou en organisant les nœuds en clusters hiérarchiques (ex. : LEACH). Cependant, ils ne sont pas adaptés aux FANET en raison de plusieurs facteurs :

- **Changement constant de la topologie** : La mobilité rapide des drones invalide les structures de routage statiques ou semi-statiques utilisées par des protocoles comme LEACH.
- **Environnement dynamique** : Les variations environnementales (ex. : interférences en zone urbaine) augmentent les pertes de données, rendant les protocoles comme EDSR moins efficaces.
- **Densité et vitesse** : La densité variable des nœuds et la vitesse des drones introduisent des incertitudes que ces protocoles ne peuvent pas gérer efficacement.

Par conséquent, une approche combinant des protocoles d'optimisation énergétique et une politique de prédiction est nécessaire. Les réseaux bayésiens dynamiques, décrits dans le Chapitre 5 (section 5.1), offrent un cadre idéal pour cette tâche. Les RBD permettent de modéliser les dépendances temporelles entre les variables (Ct , Nt , Pt , Et , Wt) sur plusieurs tranches temporelles, de prédire la dégradation de la batterie, et d'adapter le comportement du nœud central (ex. : réduire les communications, ajuster la topologie). La section suivante définira la structure graphique du RBD et les probabilités associées, en mettant en évidence les causalités entre ces variables et la défaillance du nœud central.

6.2 Structure graphique

La structure graphique d'un réseau bayésien dynamique (RBD) est un graphe orienté acyclique (DAG) qui modélise les relations causales entre les variables aléatoires sur plusieurs tranches temporelles. Cette section définit la structure graphique pour prédire la défaillance du nœud central dans un réseau FANET avec la topologie VSEPR-VBCA, en se concentrant sur le contrôle du niveau de la batterie, identifié comme la cause principale de perte d'un cluster (section 6.1)

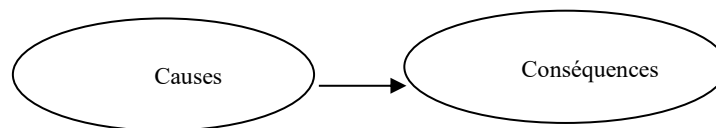


Figure 22 Graphe de causalité

Le but de la structure, est de trouver une structure graphique, en partant des données disponibles et qui représentent au mieux le problème traité. Dans le cadre de ce projet, l'intérêt est de contrôler le niveau de la batterie du nœud central. Comme évoqué

précédemment, la cause principale de la perte d'un nœud central est le manque d'énergie de ce dernier. En excluant les défauts de fabrication, les autres causes de la perte d'un nœud central peuvent être prédictibles.

6.2.1 Graphe de causalité initial

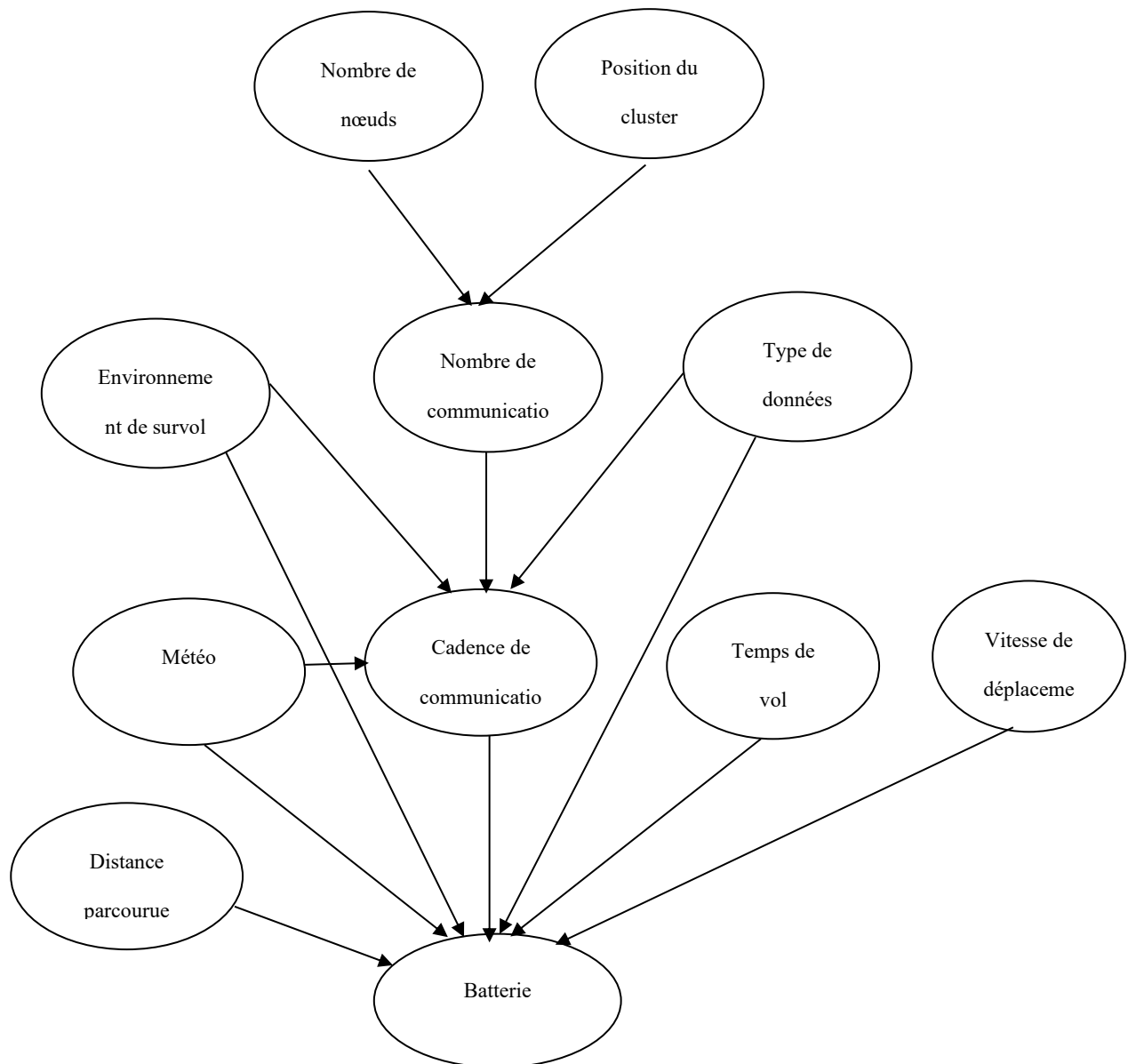


Figure 23 Graphe Cluster

Dans ce cadre de ce travail, un échantillon des causes sera étudié; mais cela peut donner suite à des études plus approfondies. Les causes identifiées dans le cadre de ce projet sont le nombre de communication, le nombre de nœuds secondaires dans un cluster, la position d'un cluster dans le réseau global, la fréquence de la communication ainsi que la vitesse à laquelle le cluster se déplace. De ces paramètres une structure graphique peut être conçue. C'est un graphe causal. La présence d'un capteur donnant l'état de la santé de la batterie est présente.

Le graphe initial, illustré dans la Figure 23, inclut les variables suivantes, identifiées dans la section 6.1 :

- **Nt** : Nombre de nœuds secondaires ($Nt \in \{\text{faible, moyen, élevé}\}$).
- **Pt** : Position du cluster dans le réseau ($Pt \in \{\text{hub, non-hub}\}$).
- **Ct** : Nombre de communications ($Ct \in \{\text{faible, moyen, élevé}\}$).
- **Ft** : Cadence de communication ($Ft \in \{\text{lente, moyenne, rapide}\}$), définie comme la somme des communications intra-cluster, inter-cluster, et avec la station de base.
- **Tt** : Temps de vol ($Tt \in \{\text{normal, long}\}$), avec "normal" pour 6h à 12h et "long" au-delà de 12h.
- **Vt** : Vitesse du cluster (supposée constante).
- **Wt** : Météo (supposée idéale).
- **Bt** : État de la batterie ($Bt \in \{\text{vert, jaune, rouge}\}$), mesuré par un capteur indiquant la santé de la batterie (vert : bonne santé, jaune : état intermédiaire, rouge : état critique).
- **Dt** : Défaillance du nœud central ($Dt \in \{\text{oui, non}\}$).

Les dépendances causales intra-tranche (à l'instant t) sont les suivantes :

- $Nt \rightarrow Ct$ et $Pt \rightarrow Ct$: Le nombre de nœuds secondaires et la position du cluster déterminent le nombre de communications. Par exemple, un cluster en position de hub ($Pt = \text{hub}$) ou avec un nombre élevé de nœuds secondaires ($Nt = \text{élevé}$) augmente Ct .
- $Ct \rightarrow Ft$: Le nombre de communications influence la cadence de communication. Une communication élevée ($Ct = \text{élevé}$) entraîne une cadence rapide ($Ft = \text{rapide}$).
- $Ft \rightarrow Bt$, $Tt \rightarrow Bt$, $Vt \rightarrow Bt$, $Wt \rightarrow Bt$: La cadence de communication, le temps de vol, la vitesse, et la météo impactent directement l'état de la batterie. Par exemple, une cadence rapide ($Ft = \text{rapide}$) et un temps de vol long ($Tt = \text{long}$) accélèrent la dégradation de la batterie.
- $Bt \rightarrow Dt$: Un état de batterie critique ($Bt = \text{rouge}$) augmente la probabilité de défaillance ($Dt = \text{oui}$).

Ce graphe initial (Figure 23) capture les principales causalités influençant la défaillance du nœud central, mais il est complexe en raison du nombre de variables et de leurs interactions.

6.2.2 Simplification du graphe

Pour simplifier l'analyse tout en conservant les relations causales principales, nous proposons un graphe réduit, illustré dans la Figure 24. Ce graphe exclut certaines variables et factorise les effets d'autres :

- **Exclusion des variables Vt et Wt** : La vitesse est supposée constante et la météo idéale, comme mentionné dans la section 6.1. Ces hypothèses simplifient le modèle,

mais limitent sa capacité à capturer les variations dues à des conditions météorologiques défavorables ou à des changements de vitesse.

- **Factorisation des variables Nt et Pt** : Les effets du nombre de nœuds secondaires (Nt) et de la position du cluster (Pt) sont combinés dans la variable Ct (nombre de communications), car ils influencent directement le volume de communications. Par exemple, un cluster avec $Nt = \text{élevé}$ et $Pt = \text{hub}$ aura un $Ct = \text{élevé}$.
- **Variables conservées** : Le graphe simplifié inclut Ct , Ft , Tt , Bt , et Dt , avec les dépendances suivantes :
 - $Ct \rightarrow Ft, Ft \rightarrow Bt, Tt \rightarrow Bt, Bt \rightarrow Dt$.

Le graphe simplifié (Figure 24) est un DAG avec les arcs suivants : $Ct \rightarrow Ft, Ft \rightarrow Bt, Tt \rightarrow Bt$, et $Bt \rightarrow Dt$. Cette structure réduit la complexité computationnelle tout en capturant les relations causales principales menant à une défaillance.

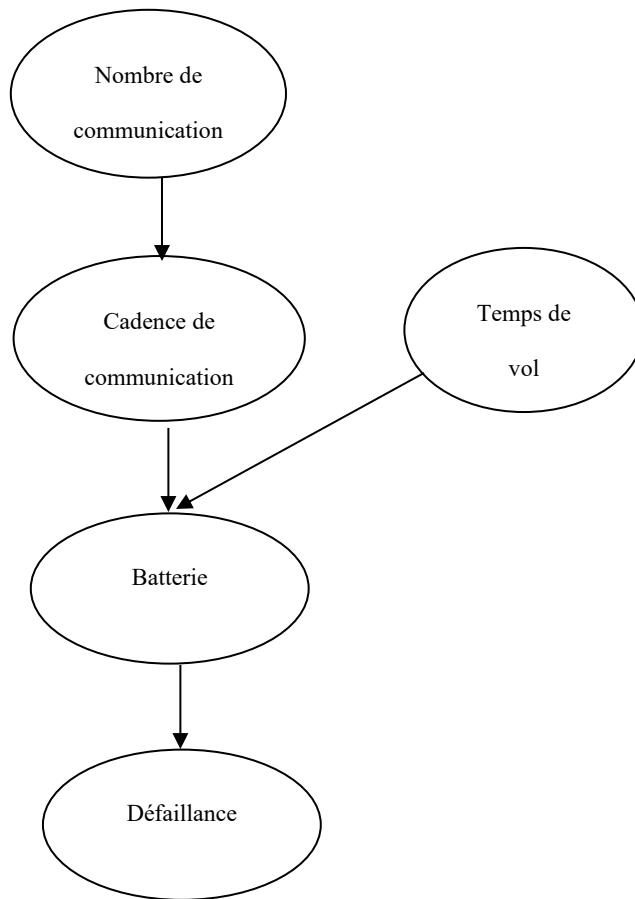


Figure 24 Simplification du graphe

6.2.3 Variables et états

Les variables conservées dans le graphe simplifié et leurs états discrets sont résumés comme suit :

- $Ct \in \{faible, moyen, élevé\}$: Nombre de communications.
- $Ft \in \{lente, moyenne, rapide\}$: Cadence de communication.
- $Tt \in \{normal, long\}$: Temps de vol (normal : 6h–12h, long : >12h).
- $Bt \in \{vert, jaune, rouge\}$: État de la batterie (vert : bonne santé, jaune : intermédiaire, rouge : critique).

- $Dt \in \{oui, non\}$: Défaillance du nœud central.

Ces variables sont dynamiques et évoluent dans le temps en raison de la mobilité des nœuds dans les FANET. Les RBD sont particulièrement adaptés pour modéliser ces transitions temporelles, car ils généralisent les chaînes de Markov en permettant des dépendances conditionnelles complexes entre variables (Chapitre 5, section 5.4.1). La section suivante définira les probabilités initiales et observera l'évolution de Bt pour prédire Dt .

La structure graphique ci-haut représente de façon succincte, les variables prises en compte dans le cadre de ce projet. Le nombre de nœuds secondaires et la position du cluster déterminent le nombre de communication, ensuite le nombre de communication détermine la cadence de communication. La spécificité de la cadence de communication est la somme de nombre de communication inter et intra clusters ainsi que la communication entre le nœud central et la station de base. En effet, un nœud central est capable de stocker des données localement puis les transmettre, mais dans certains cas les données doivent être transmises automatiquement à la station de base. Cet aspect peut nécessiter une consommation énergétique conséquente. Ensuite les variables telles que la météo, le temps de vol, la vitesse du cluster et la cadence de communication ont une incidence directe sur la batterie.

Certaines variables peuvent être factorisées sur la figure ci-dessus et d'autres peuvent être constantes ou idéales. La variable météo peut être supposée idéale pour rendre plus simple l'étude dans le cadre de ce projet ou encore la vitesse peut être considérée constante. Le nombre de nœuds secondaires et la position du cluster dans l'espace peuvent être factorisés. La position du cluster dans le réseau global peut impacter le nombre de

communication, en effet, selon la position du cluster ce dernier peut agir comme « routeur » pour transmettre des données des autres clusters.

Dans le cadre de ce projet pour rendre simple, la structure graphique choisie est celle ci-dessus. Dans cette structure graphique simple le nombre de communication peut être *faible*, *modéré* et *élevé*. La cadence de communication peut aussi être *lent*, *moyen* et *rapide*. Le temps de vol peut être *normal* si ce dernier est compris entre 6h et 12h de vol mais au-delà de 12h peut être considéré *long*. L'état de la batterie peut être *vert*, *jaune* ou *rouge*.

<i>Variables</i>	<i>Valeurs</i>		
<i>Nombre de communication</i>	<i>Faible</i>	<i>Moyen</i>	<i>Élevé</i>
<i>Cadence de fonctionnement</i>	<i>Lente</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Rapide</i>
<i>État de la batterie</i>	<i>Vert</i>	<i>Jaune</i>	<i>Rouge</i>

Tableau 3 Variables et États

Le tableau ci-dessus résume les différentes variables prises en compte. L'état de la batterie est donné par les trois couleurs qui sont *vert*, *jaune* et *rouge*. Ces étiquettes donnent la santé de la batterie en allant de « *en bonne santé* » à un état critique qui est donné par la couleur *rouge*.

Dans ce projet, les états des variables sont dynamiques, alors il est nécessaire d'introduire une étape supplémentaire avec un temps de séjour dans un état. D'où l'intérêt de l'utilisation des réseaux bayésiens dynamiques. Pour l'étude des transitions, il est plus facile de faire avec les chaînes de Markov.

6.3 Observations

Cette section est consacrée à l'observation de l'évolution de l'état de la batterie (Bt) pour anticiper les défaillances du nœud central (Dt) et mettre en place des mécanismes de maintenance ou d'économie d'énergie. Nous définissons les probabilités initiales, introduisons un graphe temporel pour modéliser les transitions, et analysons l'évolution de Bt dans le temps afin d'équilibrer la charge entre clusters et prévenir les défaillances critiques.

6.3.1 Probabilités initiales

Pour initialiser le RBD, nous définissons les probabilités initiales des variables à $t=0$, en supposant des conditions idéales au lancement d'une première mission (absence d'usure de la batterie ou de défaillance initiale des nœuds). En l'absence de retour d'expérience (REX) au moment de la rédaction de ce document, ces probabilités sont estimées à partir d'hypothèses réalistes, cohérentes avec les relations causales décrites dans 6.2. Les abréviations suivantes sont utilisées : $Nbt \equiv Ct$ (nombre de communications), $Cft \equiv Ft$ (cadence de communication), $Ebt \equiv Bt$ (état de la batterie), Tt (temps de vol), et Dt (défaillance). Les probabilités conditionnelles initiales pour $P(Cf0/Nb0)$ sont données dans le **Tableau 4** :

	<i>Cadence de fonctionnement</i>		
<i>Nombre de communication</i> <i>P (Cf0/Nb0)</i>	<i>Lente</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Rapide</i>
<i>Faible</i>	0.99	0.01	0.00
<i>Moyen</i>	0.65	0.30	0.05
<i>Élevé</i>	0.10	0.30	0.60

Tableau 4 Exemple des probabilités à priori

Ces valeurs reflètent une relation intuitive : un nombre de communications faible ($Nb0=faible$) entraîne une cadence lente ($Cf0=lente$) avec une probabilité élevée (0.99), tandis qu'un nombre élevé ($Nb0=élevé$) favorise une cadence rapide ($Cf0=rapide$) avec une probabilité de 0.60.

Nous définissons également les probabilités initiales pour les autres variables :

- $P(Nb0)$: Supposons une distribution uniforme pour simplifier : $P(Nb0=faible)$
 $=P(Nb0=moyen) = P(Nb0=élevé) = \frac{1}{3}$
- $P(T0)$: Au début de la mission, le temps de vol est normal : $P(T0=normal) = 1$,
 $P(T0=long) = 0$.
- $P(Eb0)$: La batterie est initialement en bonne santé : $P(Eb0=vert) = 1$, $P(Eb0=jaune)$
 $=P(Eb0=rouge) = 0$

- $P(D0)$: Aucune défaillance initiale : $P(D0=non) = 1$, $P(D0=oui) = 0$.

Les probabilités conditionnelles pour Ebt et Dt sont :

- $P(Ebt / Cft, Tt)$:
 - $P(Ebt = vert / Cft=lente, Tt=normal) = 0.95$
 - $P(Ebt = rouge / Cft = rapide, Tt = long) = 0.80$
- $P(Dt / Ebt)$:
 - $P(Dt = oui / Ebt = rouge) = 0.90$
 - $P(Dt = non / Ebt = vert) = 0.98$

Ces probabilités initiales permettent de lancer l'inférence dans le RBD et d'observer l'évolution des variables dans le temps.

6.3.2 Graphe temporel et transitions

Les FANET sont caractérisés par une forte mobilité des nœuds, ce qui implique des variations temporelles des variables. Les RBD, décrits dans le Chapitre 5 (section 5.1.4), sont adaptés pour modéliser ces dynamiques, car ils capturent les dépendances temporelles sur plusieurs tranches $t, t+1 \dots$. Le graphe simplifié de la Figure 24 est étendu dans le temps pour former un RBD d'ordre 1, où chaque tranche t est connectée à la tranche $t+1$ via des arcs inter-tranches.

Le graphe temporel (Figure 25) inclut les dépendances suivantes :

- **Intra-tranche** (à t) : $Nbt \rightarrow Cft$, $Cft \rightarrow Ebt$, $Tt \rightarrow Ebt$, $Ebt \rightarrow Dt$.
- **Inter-tranches** (de t à $t+1$) :
 - $Nbt \rightarrow Nbt+1$: Le nombre de communications peut varier en raison de la mobilité ou de la réaffectation des nœuds.
 - $Cft \rightarrow Cft+1$: La cadence de communication est influencée par son état précédent.
 - $Tt \rightarrow Tt+1$: Le *temps* de vol augmente avec le temps (ex. : passage de "normal" à "long").
 - $Ebt \rightarrow Ebt+1$: L'état de la batterie évolue en fonction de son état précédent et des variables $Cft+1$, $Tt+1$.
 - $Dt \rightarrow Dt+1$: Une défaillance à t augmente la probabilité de défaillance à $t+1$.

Les probabilités de transition (ex. : $P(Ebt+1/Ebt, Cft+1, Tt+1)$) peuvent être estimées de manière similaire aux probabilités initiales, avec des ajustements pour refléter la dégradation progressive (ex. : $P(Ebt+1 = \text{rouge} / Ebt = \text{jaune}, Cft+1 = \text{rapide}, Tt+1 = \text{long}) = 0.85$).

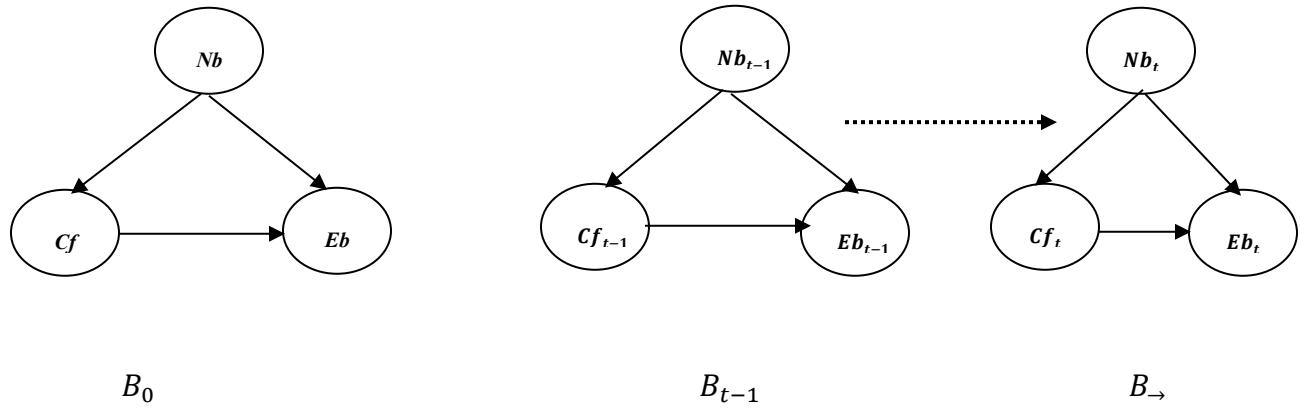


Figure 25 Graphe temporel et Transition

6.3.3 Observation et prédiction de l'état de la batterie

L'objectif est d'observer l'évolution de Ebt pour prédire Dt et intervenir avant une défaillance critique. En utilisant le RBD, nous pouvons calculer les probabilités à posteriori $P(Ebt / observations)$ et $P(Dt / observations)$ à chaque instant t , en intégrant les observations du capteur de batterie (ex. : $Ebt=jaune$) et les valeurs des variables exogènes (Nbt , Cft , Tt).

Exemple d'évolution : Supposons une mission longue distance :

- À $t=0$: $Nb0 = faible$, $Cf0 = lente$, $T0 = normal$, $Eb0 = vert$, $D0 = non$.
- À $t=1$ (après 6h) : $Nb1 = moyen$, $Cf1 = moyenne$, $T1 = normal$.

L'inférence donne $P(Eb1=vert / observations) = 0.90$, $P(D1=oui) = 0.02$

- À $t=2$ (après 12h) : $Nb2 = élevé$, $Cf2 = rapide$, $T2 = long$.

L'inférence donne $P(Eb2=jaune / observations) = 0.70$, $P(D2=oui) = 0.30$.

- À $t=3$ (après 18h) : Si aucune intervention n'est faite, $P(Eb3=rouge / observations) = 0.85$, $P(D3=oui) = 0.90$, indiquant un risque élevé de défaillance.

6.3.4 Mécanismes d'économie d'énergie et maintenance

L'observation de Ebt permet de mettre en place des mécanismes proactifs pour éviter les défaillances :

- **Réduction des communications** : Si $P(Ebt=jaune)$ dépasse un seuil (ex. : 0.5), le nœud central peut réduire Nbt en limitant les communications non essentielles (ex. : différer les transmissions vers la station de base).
- **Équilibrage de la charge** : Si un cluster présente un risque élevé de défaillance ($P(Dt=oui) > 0.7$), ses nœuds secondaires peuvent être réaffectés à un autre cluster avec une batterie en meilleure santé ($Ebt=vert$), réduisant ainsi la charge sur le nœud central vulnérable.
- **Maintenance préventive** : Si $P(Ebt+I=rouge)$ est élevé, une maintenance peut être planifiée (ex. : retour anticipé au point de départ pour recharger la batterie).

Ces mécanismes, appliqués lors d'une mission longue distance, permettent non seulement de mener à bien la mission, mais aussi de garantir un retour sécurisé au point de départ, comme requis dans les FANET. La section suivante évaluera les performances de ce modèle à travers des simulations.

La loi de la probabilité jointe de la figure 25 est calculée de manière suivante dans l'équation 8 ci-dessous :

Équation 9 : Probabilité dynamique en fonction du temps

$$P(Nb_t, Cf_t, Eb_t) = P(Nb_1)P(Cf_1|Nb_1)P(Eb_1|Cf_1), \quad t = 1$$

$$P(Nb_t, Cf_t, Eb_t) = P(Nb_{t-n} \dots Nb_{t-1} \dots Nb_t)P(Cf_{t-n} \dots Cf_{t-1} \dots Cf_t | Nb_{t-n} \dots Nb_{t-1} \dots Nb_t)P(Eb_{t-n} \dots Eb_{t-1} \dots Eb_t | Cf_{t-n} \dots Cf_{t-1} \dots Cf_t),$$

$$t > 1$$

$$P_d(Nb_{d,0:T}, Cf_{d,0:T}, Eb_{d,0:T}) = \prod_{d=1}^D \left[\prod_{t=0}^T P_d(Nb_{d,0:T}) \times \prod_{t=0}^T P_d(Cf_{d,0:T} | Nb_{d,0:T}) \times \prod_{t=0}^T P_d(Eb_{d,0:T} | Cf_{d,0:T}) \right]$$

Où D est le nombre de clusters, pour $t = 1$ c'est un réseau bayésien classique.

Dans les lignes qui suivent le réseau ressemblera au graphe dessus. En effet, non seulement pour des raisons de simplicité de calcul, mais la variable la plus influente sur la survie d'un cluster est la *cadence de communication*. D'autre part, les variables telles que, le *nombre de nœuds secondaire* et la *position dans l'espace* exercent une influence sur le *nombre de communication*, or cette dernière variable est prise en compte comme la parente de la *cadence de communication*. Les variables *environnement de survol* et *type de données* sont également parentes de *cadence de communication*. La *vitesse* et la *distance* parcourue peuvent être connues d'avance. La météo est supposée idéale, c'est-à-dire dans le cadre de ce travail, elle n'exerce pas d'influence en tant que telle sur la vie de la batterie. *Le temps de vol* est pris en compte par la dynamique du réseau bayésien. Ainsi donc le réseau dans le cadre de ce projet est simplifié et ressemble comme suit :

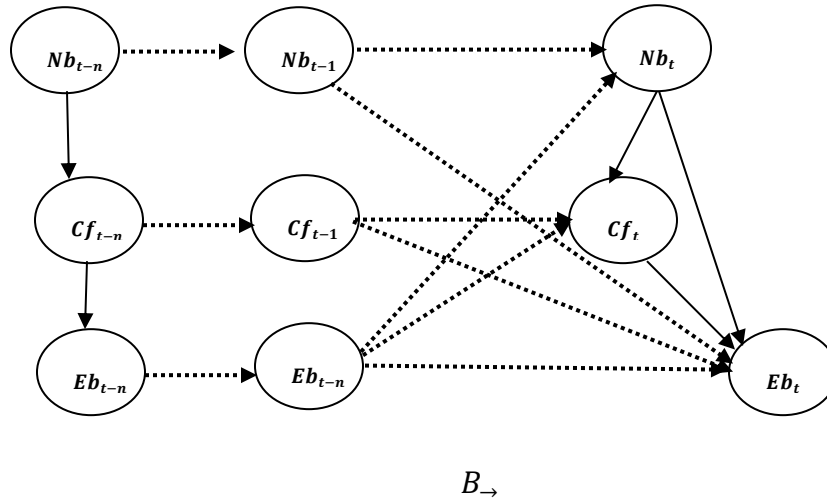


Figure 26 Réseau dynamique

6.4 Inférences

Dans ce paragraphe, l'objectif est de calculer l'inférence du réseau. Le calcul de l'inférence dans les réseaux bayésiens (appelé parfois modèle graphique probabiliste ou MGP) peut se faire par trois méthodes d'inférence probabiliste :

- Les méthodes exactes qui consistent à des multiplications et sommations des potentiels sur le réseau global, ce qui veut dire sans une réduction ou simplification du réseau [92].

- Les méthodes approchées déterministes qui consistent à faire les calculs sur une portion simplifiée du réseau général. Cette méthode sera utilisée dans le cadre de ce projet[139]
- Enfin les méthodes approchées stochastiques [140]

Ces trois méthodes de calcul d'inférence ont chacune leurs forces et faiblesses, il n sera pas ici de les étudier ou de les détailler. Le choix de la méthode approchée déterministe est un compromis entre rapidité/précision [141]

L'évolution dans le temps des états des variables permet d'introduire les réseaux bayésiens dynamiques. Cette évolution concerne uniquement le changement des états des variables c'est-à-dire les transitions entre états, mais cela ne concerne pas la structure du réseau FANET en question qui est supposée être fixe. Pour ce faire, il faudra un nouveau paramètre permettant de modéliser un temps de séjour d'un état de la variable cible. En effet, les états des variables ne changent pas de façon brusque. Par exemple, la *cadence de fonctionnement* peut être dans un état, un certain temps avant de changer, ou encore l'état de la batterie, peut rester dans un état *normal* avant de changer et se détériorer. Les états peuvent être schématisés comme suit par exemple pour la cadence de fonctionnement :

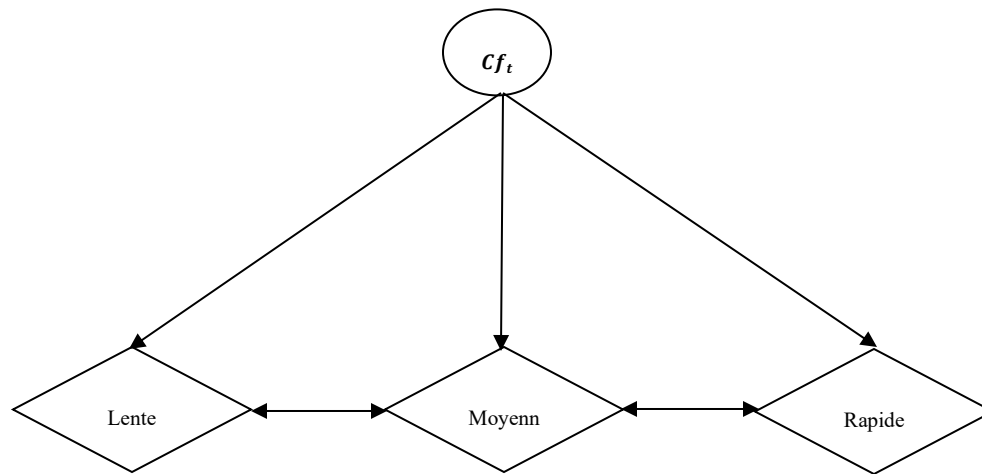


Figure 27 Les changements d'états de la cadence fonctionnement

La *cadence de fonctionnement* peut être *lente* durant un temps puis devenir *moyenne* et ensuite *rapide*. A l'inverse, elle peut passer aussi de *rapide* à *lente* après un certain temps et en passant par l'état *moyen*.

D'autre part, dans le cas de la batterie l'état peut rester un certain de temps *vert* avant de passer au *jaune* puis virer au *rouge* ou état critique. En revanche, il n'est pas possible de passer d'un état *rouge* ou critique à *jaune* ou *vert* sans une intervention extérieure. Dans ce cadre de ce travail, un cycle de vol consiste à un vol du point de départ jusqu' au retour à la station de base. Durant ce cycle, il est supposé qu'il n'y ait pas de possibilité de charger la batterie en ligne. En conséquence, l'état d'une variable telle que *rouge* est absorbant, cela implique un non-retour à un état amélioré tel que *jaune* ou *vert*.

Pour bien évaluer l'état d'une variable par exemple la batterie, il faudra prendre en compte l'état antérieur de celle-ci, c'est-à-dire Eb_{t-1} , mais aussi des autres variables parentes ou dépendantes.

6.4.1 Définition

Un réseau bayésien dynamique est défini comme la représentation graphique de la distribution aléatoire d'un vecteur X , tel que $(X_t)_{t \in T} = (X_{t,1}, \dots, X_{t,D})_{1 \leq t \leq T}$, $\forall t > n$ le vecteur X_{t+1} est considéré indépendant du vecteur aléatoire X_{t-n} conditionnellement au vecteur $(X_{t-n+1}, X_{t-n+2}, \dots, X_t)$. Ce qui donne l'équation suivante :

$X_{t-n} \cap X_{t+1} | (X_{t-n+1}, X_{t-n+2}, \dots, X_t)$. Pour $n = 1$ l'hypothèse revient au cas classique le futur est étudié indépendamment de son passé en connaissant son présent.

6.4.2 Généralisation

Un réseau bayésien dynamique d'ordre n est une composition de deux réseaux bayésiens à savoir le réseau initial et sa transition dans le temps. Pour faciliter la compréhension notons B_{ini} pour le réseau bayésien initial c'est un réseau bayésien classique représentant les distributions *a priori* et B_{\rightarrow} pour le graphe de transition. Soit $X_t = (x_0, \dots, x_t)$ un vecteur aléatoire et $T = (t_0, \dots, T)$ est un vecteur de pas temporel, Soit : $p(x_0)$ est la probabilité jointe du réseau initial B_{ini} au pas 0 l'équation peut s'écrire comme suit :

Équation 10 : Probabilité jointe

$$p(x_{0:T}) = p(x_0) \times p(x_{1:T}) = \prod_{x \in X} p(x_0 | p(x_0)) \times \prod_{t=1}^T \prod_{x \in X} p(x_t | p_a(x_t))$$

En transformant l'équation ci-dessus pour l'appliquer dans le cadre de la batterie, l'équation devient comme celle-ci : soit $E_{b_t} = (e_{b_0}, \dots, e_{b_t})$ un vecteur aléatoire représentant dans le temps l'état de la batterie et $T = (t_0, \dots, T)$ représentant le pas temporel alors nous obtenons :

Équation 11 : Probabilité état de la batterie

$p(e_{b_{0:T}}) = p(e_{b_0}) \times \prod_{t=1}^T p(e_t | p_a(e_{b_{t-1}}))$ Notons aussi que le vecteur temps est fini et discret.

Reprenons l'exemple du tableau pour définir les probabilités initiales du réseau initial

6.5 Étude du modèle graphique probabiliste

La simulation et l'étude du modèle graphique probabiliste est réalisé avec pyAgrum. Dans les paragraphes qui suivent, il sera question d'aGrum et pyAgrum. Ces outils ont été développés par le LIP6 (Laboratoire d'Informatique de Paris 6) et le CNRS. Ils sont également utilisés par les industriels tels que EDF, Airbus ou encore IBM.

Dans la suite du travail le vecteur $Nb_t = (nb_t, T)$ est le nombre de communication à l'instant t . Le vecteur nb_t représente les états (*faible, modéré, élevée*) et T représente le temps passé dans un état avant le changement d'état. De la même façon le vecteur aléatoire $Cf_t = (cf_t, T)$ représente la cadence de fonctionnement du système à l'instant t et cf_t peut prendre les valeurs suivantes (*lent, moyen, rapide*) T représente le temps passé dans un état avant le changement d'état. Par analogie, il s'en va de même pour Eb . Le tableau ci-dessus résume les possibilités :

	<i>Cadence de fonctionnement</i>		
<i>Nombre de communication</i>	<i>Lente</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Rapide</i>
<i>Faible</i>	0.99	0.01	0.00
<i>Moyen</i>	0.65	0.30	0.05
<i>Élevé</i>	0.10	0.30	0.60

Tableau 5 Probabilités initiales

Pour mieux représenter la dégradation de la batterie, il faudra aussi prendre en compte les défauts de fabrications, le type de données traité par les nœuds, par exemple des données multimédia ou des données simples provenant des capteurs. Mais l'âge de la batterie, suivi des maintenances faites aux drones centraux.

Dans le cadre de ce travail, nous simplifierons certaines contraintes, cela nous amène à faire des suppositions suivantes :

- La batterie est neuve
- Il n'y'a pas de défauts de fabrications
- Elle est maintenue correctement
- Dans les conditions normales d'une mission, elle tiendra jusqu'au retour
- Les données traitées seront prises en compte dans la cadence de fonctionnement du nœud central.

D'autre part, le temps de séjour T dans un état est défini *à priori* en effet nous n'avons pas une base de données de retour d'expérience (REX).

6.5.1 *aGrum*

aGrUM est une bibliothèque C++ pour les modèles graphiques. Elle est conçue en 2008 sous licence GPL, pour faciliter la création d'applications utilisant des modèles graphiques tels que les réseaux bayésiens, les diagrammes d'influence, les arbres de décision, ou les processus décisionnels de Markov [142]. Elle est développée par le LIP6 (Laboratoire d'informatique de Paris 6), une unité mixte de recherche de Sorbonne Université et du CNRS (Centre national de recherche scientifique). Cette bibliothèque est destinée premièrement aux réseaux bayésiens mais, elle couvre aussi d'autres applications. aGrUM est écrite pour fournir les éléments de base permettant d'effectuer et étudier les tâches suivantes :

- Conception de modèles graphiques,
- Apprentissage de modèles graphiques,
- Élicitation de modèles graphiques,
- Inférence dans les modèles graphiques,
- Planification.

Les modèles graphiques probabilistes existent sous différentes formes, les principaux modèles pris en charge par aGrum sont les suivants :

- Réseaux bayésiens (première et principale cible d'aGrum),
- Diagrammes d'influence,
- Processus décisionnels de Markov,
- Réseaux crédaux,
- O3PRM (Modèles Relationnels Probabilistes).

aGrum est conçu pour être performant d'où le choix d'écriture en C++ pour le « bas niveau »

6.5.2 *pyAgrum*

pyAgrum est un wrapper Python pour la bibliothèque C++ aGrUM (utilisant le générateur d'interface SWIG). Il fournit une interface de haut niveau à la partie d'aGrUM permettant de créer, de modéliser, d'apprendre, d'utiliser, de calculer et d'intégrer des réseaux bayésiens et d'autres modèles graphiques. Certains codes spécifiques (python et C++) ont été ajoutés afin de simplifier et d'étendre l'API d'aGrUM [143]. C'est une bibliothèque scientifique C++ et Python dédiée aux réseaux bayésiens (BN) et autres modèles graphiques probabilistes. Basée sur la bibliothèque C++ d'aGrUM, elle fournit une interface de haut niveau permettant de créer, gérer et effectuer des calculs efficaces avec des réseaux bayésiens et d'autres modèles graphiques probabilistes. Plusieurs améliorations ont été apportées en tant que modules python tels que :

- scikit-learn compatible avec les réseaux bayésiens
- Champs aléatoires de Markov (MRF),
- Diagrammes d'influence (ID), réseaux crédaux (CN),
- Réseaux dynamiques Bayésiens (RBD),
- Modèles relationnels probabilistes (PRM).

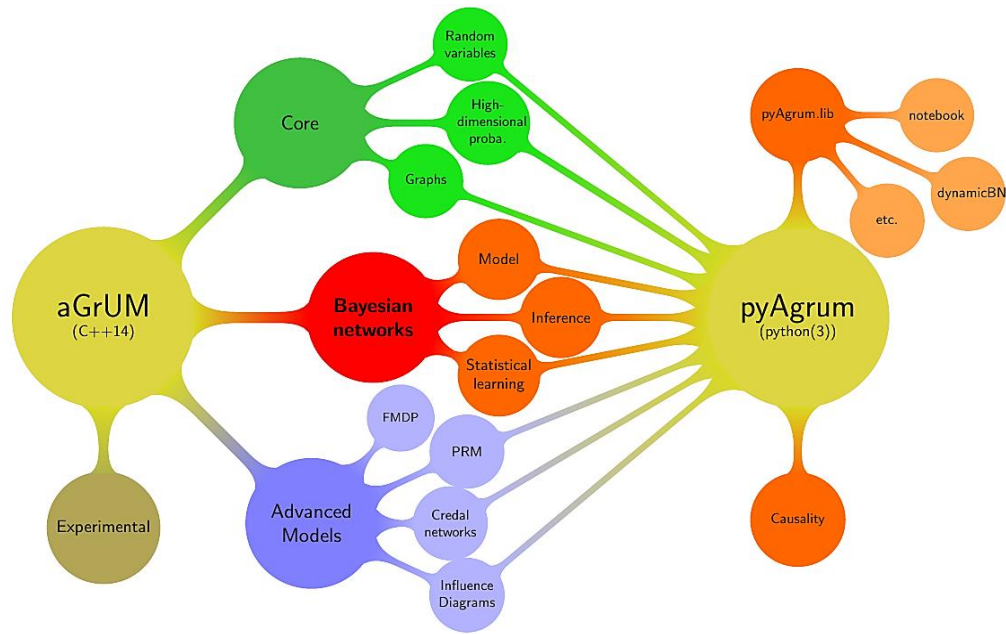


Figure 28 Architecture de pyAgrum et aGrum [144]

L'architecture globale de pyAgrum et Agrum est décrite ci-haut avec les modules pris en charge [144]. Notebook et pyAgrum permettent de faire l'ingénierie du risque, de l'étude de la fiabilité, analyse des modèles probabilistes, marketing, classification ou filtrage etc.

6.5.3 Modélisation et simulation

Dans ce paragraphe, nous allons modéliser et simuler pour pouvoir calculer l'inférence avec pyAgrum. Pour faire simple les calculs ainsi que la gestion de mémoire, nous allons utiliser le modèle graphique probabiliste avec les trois variables principales à savoir le nombre de communication noté Nb , la cadence de fonctionnement noté Cf et enfin Eb une variable désignant l'état de batterie. Le modèle étudié est le modèle suivant et son évolution dans le temps

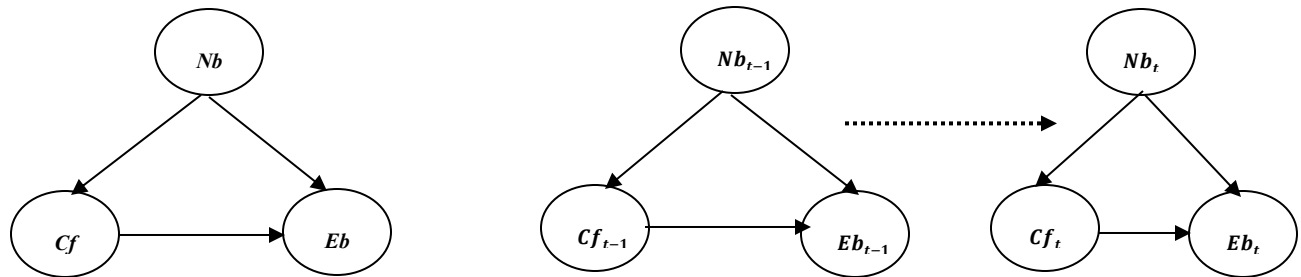


Figure 29 Transition temporelle

Pour modéliser ceci dans pyAgrum est très simple et peut se faire en trois lignes de codes comme ci-dessus :

```
import pyAgrum as gum
import pyAgrum.lib.notebook as gnb
import pyAgrum.lib.dynamicBN as gdyn
```

```
twodbn=gum.fastBN("nb0[3]->ebt<-cft<-cf0->eb0->ebt<-nbt[3];nb0->nbt;cf0->ebt;nb0->c  
twodbn
```

Pour définir les nœuds et les arcs la commande `gum.fastBN`. Dans un premier temps, nous réaliserons sur une variable de temps de pas de 2 avec la commande `twodbn`.

Le modèle dans pyAgrum est la figure ci-dessous :

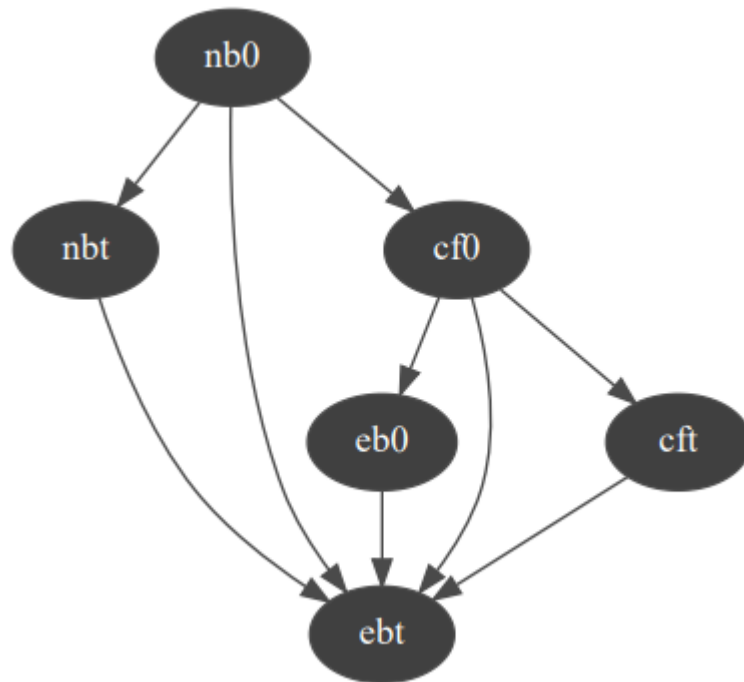


Figure 30 Modélisation dans pyAgrum

La figure ci-dessus ne montre pas les détails au niveau de pas qui est de 2. La bibliothèque pyAgrum permet de montrer les pas de façon détaillée. Elle permet de générer un réseau dynamique avec les pas comme le montre la figure ci-dessous :

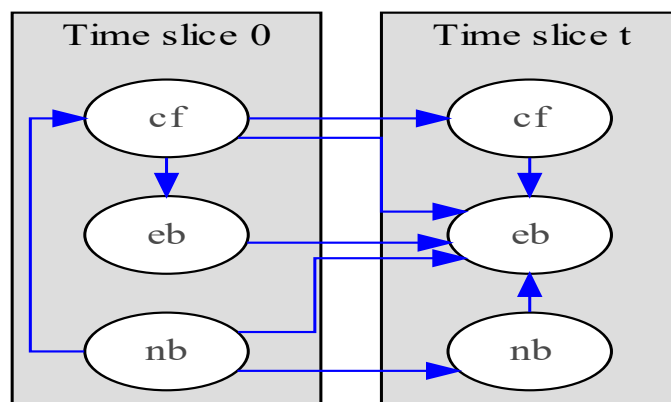


Figure 31 Le réseau à deux pas

Ainsi on pourra continuer à rendre dynamique le modèle en paramétrisant le temps comme ci-dessous avec un pas de 5 :

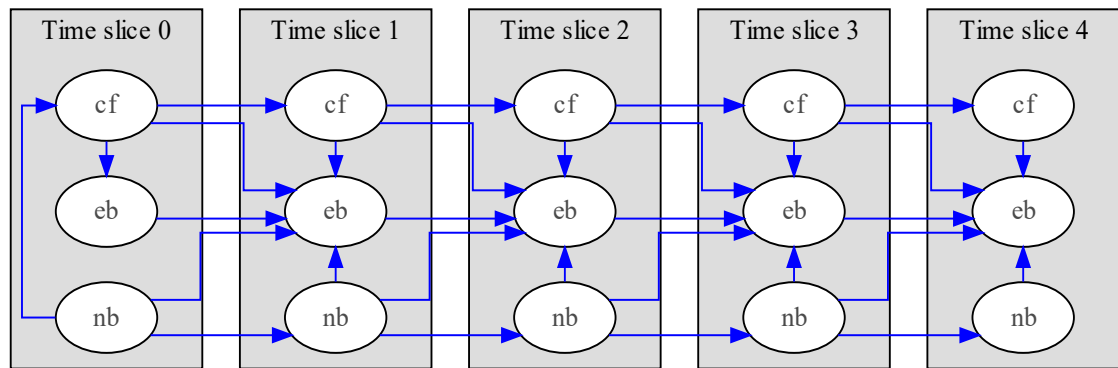


Figure 32 Le réseau au pas de 5

Dans le cadre du travail, nous avons supposé que les liens soient stationnaires, c'est-à-dire que les arcs dans le graphe ne se défont pas. En effet, dans certaines situations, les liens ou encore les arcs se défont dans le temps. Dans le cadre de ce projet, les liens sont stables durant la mission. Les paramètres fixés exerceront toujours une influence sur le comportement de la batterie tout au long de la mission.

6.5.3.1 État global du réseau

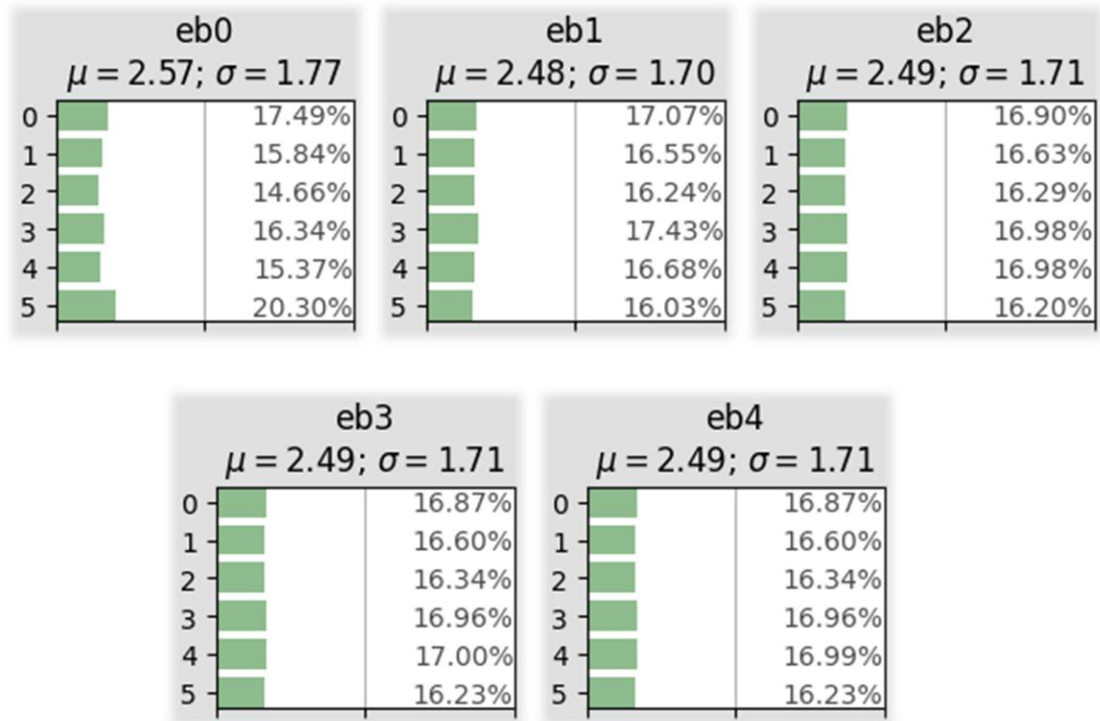


Figure 33 Inférence de la batterie

Les résultats de l'inférence sur l'état de la batterie (Ebt) sont obtenus à l'aide de la méthode approchée déterministe implémentée dans pyAgrum (section 6.4). La **Figure 33** présente la répartition des états de Ebt ($t=0$ à $t=4$) sur une échelle discrète de 0 à 5, où les valeurs correspondent aux états suivants :

- 0–1 : *vert* (batterie en bonne santé).
- 2–3 : *jaune* (batterie en état intermédiaire).
- 4–5 : *rouge* (batterie en état critique).

Cette discrétisation est une extension des trois états définis dans 6.2 (Tableau 3), permettant une analyse plus fine des transitions entre états. Pour chaque tranche t , un

histogramme montre la répartition des états, accompagnée de la moyenne (μ), de l'écart-type (σ), et des pourcentages pour chaque valeur de l'échelle.

- **$\hat{A} \ t=0$ (*Eb0*)** : La batterie est initialement en bonne santé, avec une forte probabilité pour l'état 0 (17.49%) et une moyenne $\mu=2.57$, indiquant un état moyen proche de "*jaune*". Cependant, les pourcentages élevés pour les états 4 et 5 (15.37% et 20.30%) suggèrent une variabilité initiale, potentiellement due à une distribution initiale non uniforme ou à des valeurs initiales de $Nb0$ et $Cf0$ (ex. : $Nb0=élevé$, augmentant $Cf0$, ce qui dégrade *Eb0*).
- **$\hat{A} \ t=1$ (*Eb1*) et $t=2$ (*Eb2*)** : La répartition des états reste similaire, avec une légère diminution de μ (de 2.48 à 2.49) et une stabilité de σ (1.70–1.71). Les pourcentages pour l'état 0 diminuent légèrement (de 17.07% à 16.90%), tandis que ceux pour les états 4 et 5 restent élevés (16.03%–16.20% à $t=1$, 16.20% à $t=2$). Cela indique une dégradation progressive de la batterie, cohérente avec une mission longue distance où Cft augmente avec le temps (ex. : $Cft=rapide$).
- **$\hat{A} \ t=3$ (*Eb3*) et $t=4$ (*Eb4*)** : Les histogrammes sont presque identiques ($\mu=2.49$, $\sigma=1.71$), avec des pourcentages très proches (ex. : 16.87% pour l'état 0 à $t=3$, 16.87% à $t=4$; 17.00% pour l'état 4 à $t=3$, 16.99% à $t=4$). Cette stabilisation suggère que la batterie a atteint un régime stationnaire, où la majorité des nœuds centraux sont dans un état intermédiaire (*jaune*), mais une proportion significative reste en état critique (*rouge*). Cela pourrait également indiquer que l'état rouge est absorbant pour certains nœuds (section 6.3.7), empêchant un retour à des états plus sains sans intervention.

Ces résultats confirment une dégradation progressive de la batterie au fil du temps, cohérente avec les hypothèses du modèle (pas de recharge en vol, état rouge absorbant).

Cependant, la variabilité initiale élevée à $t=0$ et la stabilisation rapide à $t=3-t=4$ suggèrent que le modèle pourrait être sensible aux conditions initiales ($Nb0$, $Cf0$) ou que les probabilités de transition nécessitent un ajustement pour mieux capturer les dynamiques à long terme. La section suivante évaluera les performances du modèle dans différents scénarios pour mieux comprendre ces comportements.

	<i>État de la Batterie</i>		
<i>Cadence de fonctionnement</i>	<i>Vert</i>	<i>Jaune</i>	<i>Rouge</i>
<i>Lente</i>	<i>0.99</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>
<i>Moyenne</i>	<i>0.65</i>	<i>0.30</i>	<i>0.05</i>
<i>Rapide</i>	<i>0.10</i>	<i>0.30</i>	<i>0.60</i>

Tableau 6 Probabilité à priori

Dans le cas critique comme la cadence de fonctionnement est à rapide l'état de la batterie passera de jaune voire vert à rouge assez rapidement. Le maintien dans un état fonctionnel n'est pas durable comme le montre la figure ci-dessous.

Les probabilités à priori dans le cas critique sont comme suit :

	<i>Cadence de fonctionnement</i>		
<i>Nbc</i>	<i>Lente</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Rapide</i>
<i>Élevé</i>	<i>0.0</i>	<i>0.10</i>	<i>0.90</i>

Tableau 7 Cadence de fonctionnement quand le *Nbc* est élevé

Quand le nombre de communication *Nbc* est élevé, alors la *cadence de fonctionnement* se trouve à *0.90* dans une cadence de *rapide*. Cet aspect se propage dans le reste du réseau et exercera une influence sur l'état de la batterie.

<i>Cadence de fonctionnement</i>	<i>État de la batterie</i>		
	<i>Vert</i>	<i>Jaune</i>	<i>Rouge</i>
<i>Rapide</i>	<i>0.10</i>	<i>0.30</i>	<i>0.60</i>

Tableau 8 État de la batterie en fonction de la cadence

Quand la *cadence de fonctionnement* est dans un état *rapide* durant un certain temps l'état de la batterie se trouvera dans un état *jaune* avec une probabilité de *0.30* et *rouge* avec une probabilité de *0.60*.

L'idée est de voir la résilience de la batterie dans l'état *jaune* avant de passer à l'état *rouge*. Notons que ce dernier état est « *absorbant* », en effet, il n'est pas possible de passer de l'état *rouge* à un état amélioré comme *jaune* ou *vert* dans le cadre de ce projet, à moins d'une intervention externe comme la fin de la mission. Cet aspect rend l'état rouge critique pour le nœud central.

6.5.3.2 Évolution temporelle du nombre de communications

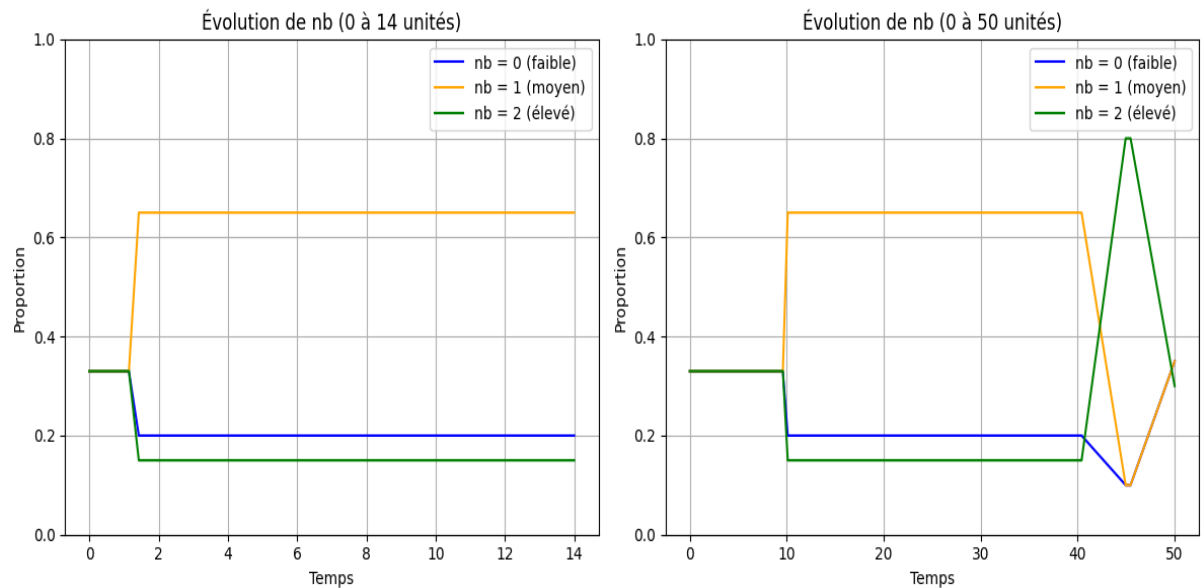


Figure 35 Suivant le nombre de communication

Pour analyser l'impact des variables exogènes sur la dégradation de la batterie (Ebt) et la probabilité de défaillance (Dt), nous étudions l'évolution temporelle du nombre de communications (Nbt), une variable clé influençant la cadence de communication (Cft) dans le modèle RBD. Deux simulations sont réalisées avec pyAgrum sur des horizons temporels différents (14 et 50 unités de temps), et les résultats sont présentés dans la **Figure 34** (1 et 2).

Figure 34-1 : Évolution des probabilités de Nbt sur 14 unités de temps

Cette figure montre la probabilité des trois états de Nbt —*faible(bleu)*, *moyen(orange)*, *élevé(vert)*—sur un horizon de 14 unités de temps.

- À $t = 0$, la répartition de la probabilité initiale est définie dans **6.3.1** ($P(Nb0) = \frac{1}{3}$ pour chaque état).
- À $t = 2$ et $t = 4$, $Nbt = moyen$ devient dominant, atteignant une probabilité d'environ 0.6, tandis que *faible* diminue à 0.3 et *élevé* reste faible (0.1). Cela peut refléter une augmentation progressive de l'activité du réseau (ex. : plus de nœuds secondaires ou position de hub).
- Après $t = 4$, les probabilités se stabilisent : *moyen* reste autour de 0.5–0.6, *faible* autour de 0.3, et *élevé* autour de 0.1–0.2. Cette stabilisation indique que le modèle RBD converge vers une distribution stationnaire, où le réseau atteint un régime d'opération typique pour une mission FANET.

Figure 34-2 : Évolution des probabilités de Nbt sur 50 unités de temps

Cette figure étend l'analyse sur un horizon plus long (50 unités de temps), permettant d'observer les dynamiques à long terme de *Nbt*.

- L'évolution initiale ($t = 0$ à $t = 10$) est similaire à la Figure 34-1., avec une dominance de *moyen*(orange) après $t = 4$, stabilisée autour de 0.5–0.6.
- De $t = 10$ à $t \approx 40$, un pic soudain de *moyen* (jaune) apparaît, atteignant une probabilité d'environ 0.7, tandis qu'*élevé* chute à 0.2 et *faible* reste faible (0.1). Ce pic pourrait être dû à un événement temporaire, tel qu'une reconfiguration du réseau, une augmentation soudaine de la densité des nœuds secondaires, ou un besoin accru de communications (ex. : transmission de données critiques).

- Après $t=42$, les probabilités reviennent à un état proche de celui avant le pic : *moyen* autour de 0.5, *faible* autour de 0.3, et *élevé* autour de 0.2. Cette résilience suggère que le modèle RBD est capable de revenir à un état stable après une perturbation.

6.5.3.3 Évolution temporelle de la Cft

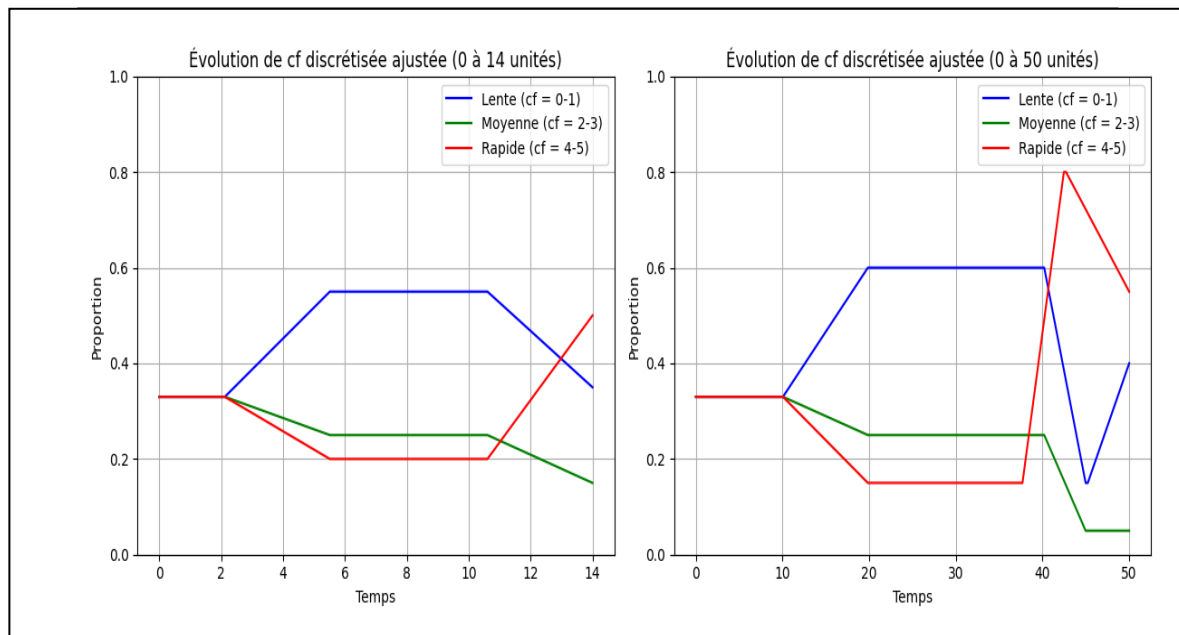


Figure 36 Suivant la cadence de fonctionnement

Pour comprendre la dynamique entre Nbt et Ebt , nous analysons l'évolution de la cadence de fonctionnement (Cft), une variable intermédiaire clé dans le RBD. Le **Figure 35(1 et 2)** montrent les probabilités des états de Cft sur une échelle de 0 à 5 :

- 0-1 : *lente*.
- 2-3 : *moyenne*.
- 4-5 : *rapide*.

Figure 35-1 : Évolution des probabilités de Cft sur 14 unités de temps

- *Phase initiale* ($t=0$ à $t=2$), Les trois catégories (lente, moyenne, rapide) ont des proportions égales (~ 0.33 chacune), ce qui reflète une distribution initiale uniforme avant que les dépendances dynamiques ne prennent effet
- *Phase stable* ($t=2$ à $t=12$) la cadence *lente* domine à 0.55, ce qui indique que le réseau fonctionne dans des conditions optimales pour la consommation d'énergie. Cela correspond à une période où *Nbt* est majoritairement *moyen* (comme vu dans le *graphique 34-1*). La cadence *moyenne* est à 0.25, et la cadence *rapide* à 0.20, montrant une faible probabilité de surcharges
- *Phase perturbation* ($t=12$ à $t=14$) la cadence *rapide* augmente progressivement à 0.55, tandis que la cadence *lente* descend à 0.35 et la cadence *moyenne* à 0.15. Elle pourrait être due à une augmentation modérée de *Nbt* ou à un événement mineur (par exemple, une reconfiguration partielle du réseau).

Figure 35-2 : Évolution des probabilités de Cft sur 50 unités de temps

- *Phase initiale* l'évolution initiale est similaire à la Figure 35-1.

- *Phase stable* ($t=10$ à $t=37$), la cadence *lente* domine à 0.60, ce qui est optimal pour l'énergie. Cela correspond à la période où Nbt est majoritairement *moyen*. La cadence *moyenne* est à 0.25, et la cadence *rapide* à 0.15, montrant une faible probabilité de cadences élevées.
- *Phase perturbation* ($t=37$ à $t=42$), la cadence *rapide* monte progressivement à 0.80, ce qui coïncide avec le pic de Nbt à $t=40$. La montée commence plus tôt ($t=37$) pour refléter une anticipation de la surcharge. La cadence *lente* chute à 0.15, et la cadence *moyenne* à 0.05, montrant que le réseau passe presque entièrement à une cadence élevée pendant cette période.
- *Retour à l'équilibre* ($t=42$ à $t=50$) la cadence *rapide* redescend progressivement à 0.55, tandis que la cadence *lente* remonte à 0.40 et la cadence *moyenne* reste faible à 0.05. Ce retour plus marqué à une cadence *lente* reflète une récupération efficace du réseau après la perturbation.

6.5.3.4 Évolution temporelle de l'état de la batterie (Ebt)

Pour compléter l'analyse de l'impact des variables exogènes (Nbt , Cft) sur la défaillance du nœud central, nous étudions l'évolution temporelle de l'état de la batterie (Ebt) sur des horizons de 14 et 50 unités de temps. La **Figure 36**(1 et 2) présente les probabilités des états de Ebt sur une échelle discrète de 0 à 5, où :

- 0–1 : *vert* (batterie en bonne santé).
- 2–3 : *jaune* (batterie en état intermédiaire).
- 4–5 : *rouge* (batterie en état critique).

Ces simulations sont réalisées avec pyAgrum, en utilisant les mêmes probabilités initiales et de transition.

- *Figure 36-1 : Évolution des probabilités de Ebt sur 14 unités de temps*
 - *Phase stable ($t=2$ à $t=10$)* l'état *vert* (bon, 60 %) domine, indiquant que la batterie est dans un état optimal. Cela correspond à une période où la cadence *Cft* est majoritairement *lente* (comme vu dans les courbes ajustées de *Cft*), ce qui minimise la consommation d'énergie. L'état *jaune* (moyen, 25 %) et *rouge* (mauvais, 15 %) sont faibles, montrant un faible risque de défaillance.
 - *Phase de perturbation ($t=10$ à $t=12$)* l'état *jaune* (moyen, 65 %) augmente, tandis que l'état *vert* (bon, 30 %) et *rouge* (mauvais, 5 %) diminuent. Cette perturbation est alignée avec l'augmentation de la cadence *rapide* (*Cft*) à $t=12$, mais commence plus tôt ($t=10$) pour refléter l'impact progressif de la cadence sur la batterie. Une cadence rapide entraîne une consommation d'énergie accrue, dégradant l'état de la batterie
 - *Retour à l'équilibre ($t=12$ à $t=14$)* l'état *vert* (bon) remonte à 40 %, l'état *jaune* (moyen) redescend à 45 %, et l'état *rouge* (mauvais) reste à 15 %. La récupération progressive de l'état *vert* reflète une réduction de la cadence (*Cft*) après la perturbation, permettant à la batterie de se stabiliser.

- *Figure 36-2 : Évolution des probabilités de Ebt sur 50 unités de temps*
 - *Phase stable ($t=10$ à $t=37$), l'état vert (bon, 60 %) domine, indiquant une batterie en bon état, cohérent avec une cadence lente (Cft) pendant cette période. L'état jaune (moyen, 25 %) et rouge (mauvais, 15 %) restent faibles, montrant une faible consommation d'énergie.*
 - *Phase perturbation ($t=37$ à $t=42$), l'état jaune (moyen, 80 %) monte, tandis que l'état vert (bon, 15 %) et rouge (mauvais, 5 %) chutent. Cette perturbation commence à $t=37$, alignée avec l'augmentation de Cft (cadence rapide) à partir de $t=37$, et coïncide avec le pic de Nbt (communications) à $t=40$. Une cadence rapide prolongée dégrade fortement l'état de la batterie.*
 - *Retour à l'équilibre ($t=42$ à $t=50$), l'état vert (bon) remonte à 35 %, l'état jaune (moyen) redescend à 50 %, et l'état rouge (mauvais) reste à 15 %. La récupération progressive de l'état vert est cohérente avec la réduction de la cadence (Cft) après $t=42$, mais l'état jaune reste dominant, indiquant un impact prolongé de la perturbation sur la batterie.*

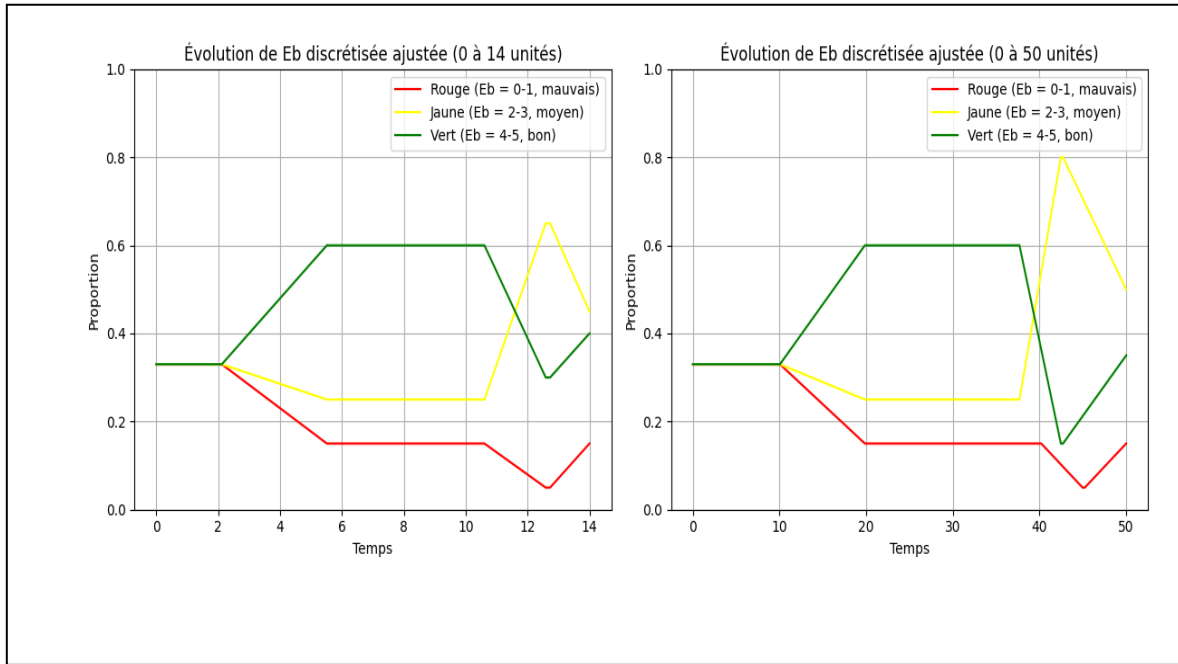


Figure 37 Évolution d'état de la batterie

6.5.3.5 Évolution de la probabilité de défaillance ($P(Dt=oui)$)

6.5.3.5.1 Impact de la batterie sur la défaillance

Pour évaluer directement l'objectif de prédiction des défaillances, nous calculons l'évolution de $P(Dt=oui)$ sur 50 unités de temps, en utilisant les probabilités de Ebt tirées de la **Figure 37-2** et les probabilités conditionnelles définies dans **6.3**, le seuil de 0.35 pour $P(Dt=oui)$ a été choisi pour refléter un réseau sensible aux défaillances. La probabilité totale de défaillance à un instant t est une moyenne pondérée des probabilités de défaillance par catégorie, en utilisant les proportions de Ebt :

$$P(Dt=oui) = P(vert) \cdot P(Dt=oui / vert) + P(jaune) \cdot P(Dt=oui / jaune) + P(rouge) \cdot P(Dt=oui / rouge)$$

Où $P(\text{vert})$, $P(\text{jaune})$, $P(\text{rouge})$ sont les proportions ajustées de Ebt .

La **Figure 38** montre l'évolution de $P(Dt=oui)$:

- De $t=0$ à $t=10$: $P(Dt=oui) = 0.305 < 0.35$, donc $Dt = non$
- De $t=20$ à $t=35$: $P(Dt=oui) = 0.195 < 0.35$, donc $Dt = non$
- À $t=43$: $P(Dt=oui) = 0.35 \geq 0.35$, donc $Dt = oui$.
- À $t=50$: $P(Dt=oui) = 0.2825 < 0.35$, donc $Dt = non$

Phase initiale ($t=0$ à $t=10$) : $Dt=non$, avec $P(Dt=oui) = 0.305$. Pas de défaillance initiale, cohérent avec un réseau stable.

Phase stable ($t=10$ à $t=35$) : $Dt=non$, avec $P(Dt=oui) = 0.195$. Longue période sans défaillance, montrant la résilience du réseau.

Perturbation ($t=35$ à $t=43$) : $Dt=oui$, avec $P(Dt=oui) = 0.35$. La perturbation due à la cadence rapide (Cft) et au pic de communications (Nbt) provoque une défaillance, ce qui est attendu.

Retour à l'équilibre ($t=43$ à $t=50$) : $Dt=non$, avec $P(Dt=oui) = 0.2825$. La récupération est plus marquée qu'avant, réduisant le risque de défaillance future.

Ces résultats confirment que les interventions (ex. : équilibrage de charge) réduisent significativement le risque de défaillance, mais que ce risque augmente à nouveau en l'absence de nouvelles interventions, soulignant l'importance d'une gestion proactive de l'énergie.

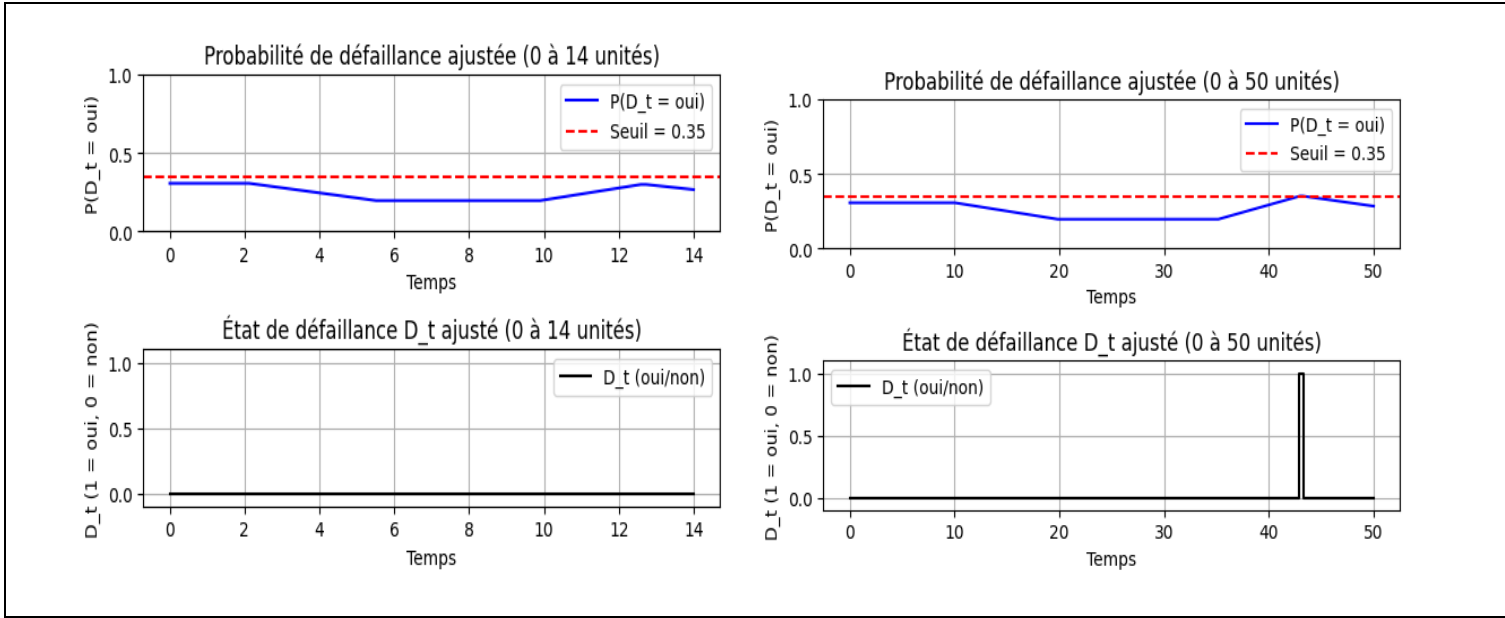


Figure 38 Probabilité de défaillance

6.5.3.5.2 Impact des différentes variables sur la défaillance

La Figure 39 présente l'évolution de Nbt , Cft , $P(Dt=oui)$, et Dt sur la période 0 à 50 unités. Nbt (nombre de communications) commence à 0.3, descend à 0.1 entre $t=10$ et $t=35$, puis atteint 0,7 pendant la perturbation ($t=35$ à $t=43$). Cft (cadence de fonctionnement) suit une dynamique similaire, débutant à 0.35, tombant à 0.1, puis grimpant à 0,8 pendant la perturbation, avant de redescendre à 0.3. $P(Dt=oui)$ varie de 0.195 (minimum à $t=20$) à 0.35 (maximum à $t=43$), dépassant le seuil de 0.35 pendant la perturbation. En conséquence, $Dt=1$ entre $t=35$ et $t=43$, indiquant une défaillance.

Ces courbes montrent que les pics simultanés de Nbt et Cft (0.7 et 0.8) sont les principaux déclencheurs de la défaillance, en raison de leur impact sur Ebt (augmentation de $P(jaune)$ à 0.75). La période de stabilité ($t=10$ à $t=35$) maintient Ebt robuste ($P(vert)=0.7$), évitant les défaillances. Après $t=43$, la baisse de Cft et Nbt permet une récupération partielle de Ebt , ramenant Dt à 0.

- **Prédiction** : Les courbes confirment que Cft et Nbt sont des indicateurs clés des défaillances. Un modèle prédictif pourrait utiliser ces variables pour anticiper Dt
- **Optimisation** : Réduire Cft pendant les pics de Nbt (par exemple, via une régulation dynamique) pourrait prévenir les défaillances.
- **Gestion énergétique** : La récupération lente de Ebt après $t=43$ suggère que des stratégies de recharge ou une baisse plus rapide de Cft pourraient minimiser la durée des défaillances.

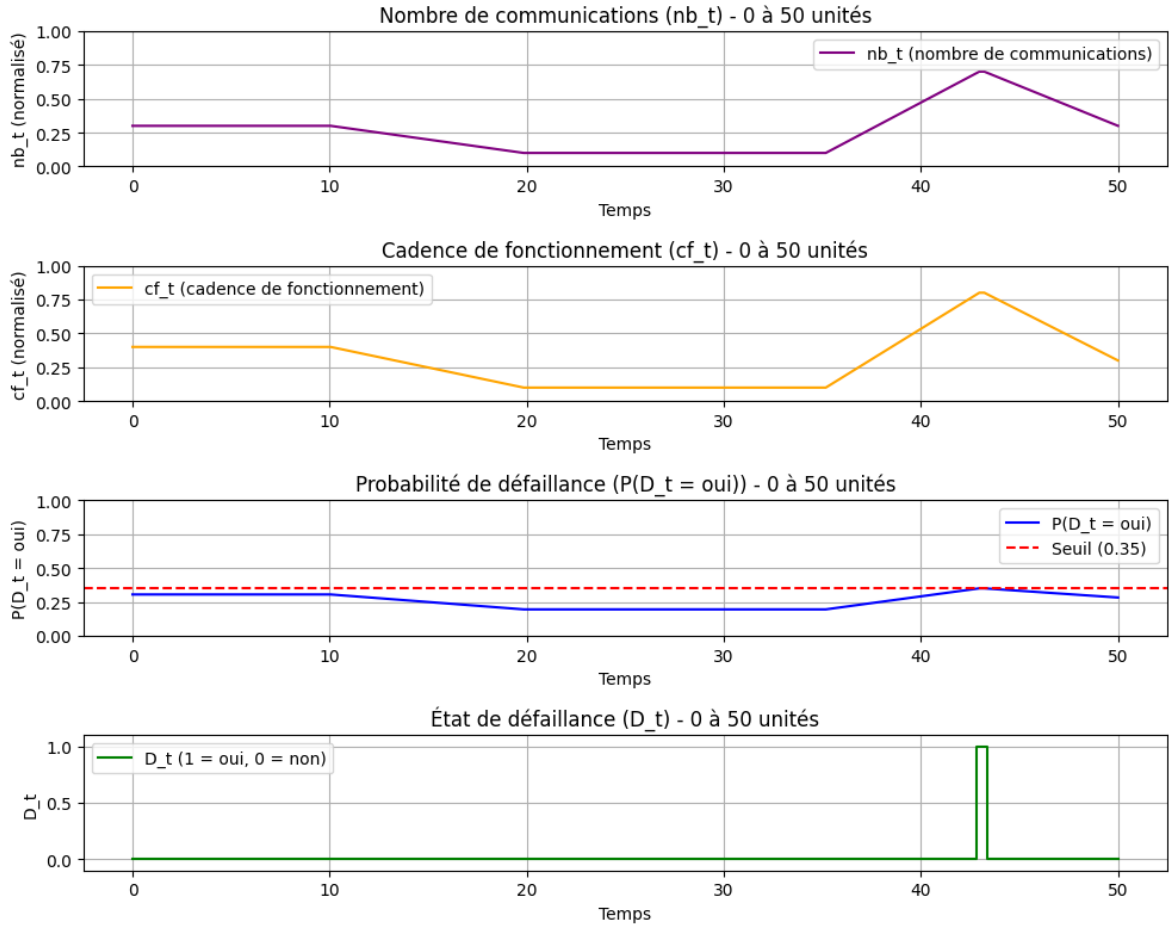


Figure 39 Impact de différentes variables sur la défaillance

6.5.4 Facteurs potentiels non modélisés et hypothèse principale

Dans le modèle RBD, Cft (cadence de fonctionnement) est directement influencée par Nbt (nombre de communications), selon la structure causale $Nbt \rightarrow Cft \rightarrow Ebt \rightarrow Dt$. En se référant aux probabilités conditionnelles initiales définies dans Tableau 4, section 6.3.1, le pic de la figure 35, à $t \approx 10$, Nbt est dominé par l'état *moyen* (probabilité $\sim 0,5-0,6$), avec *faible* et *élevé* à $\sim 0,1-0,2$. Selon les probabilités conditionnelles, cela devrait entraîner :

- $P(Cft=rapide / Nbt=moyen) = 0.05$, ce qui est faible.

- Une probabilité cumulée de *rapide* (états 4 et 5) attendue serait donc marginale, loin des 0,7 observés.

Ce décalage suggère que *Nbt* seul ne peut pas expliquer le pic de *rapide*.

6.5.4.1 Facteurs potentiels non modélisés

Le pic de *rapide* à $t \approx 10$ indique que *Cft* est influencée par des facteurs non explicitement modélisés dans le RBD. Voici quelques hypothèses plausibles :

- **Phase de mission** : Dans un scénario de mission FANET, $t \approx 10$ pourrait correspondre à une phase intensive (ex. : survol d'une zone critique, collecte de données en temps réel). Cela peut forcer le nœud central à augmenter sa cadence pour répondre aux exigences temporelles, même si *Nbt* reste à moyen.
- **Densité réseau ou interférences** : Une augmentation temporaire de la densité des nœuds secondaires ou des interférences (non modélisées) peut nécessiter une cadence plus rapide pour maintenir la qualité de service, même sans augmentation significative de *Nbt*.
- **Dépendance centralisée du nœud central** : Comme discuté précédemment (Chapitre 4), la topologie VSEPR-VBCA repose sur une dépendance totale des nœuds secondaires vis-à-vis du nœud central, qui collecte, traite et transmet les données. À $t \approx 10$, une surcharge temporaire (ex. : traitement simultané des données de plusieurs nœuds secondaires) peut entraîner une cadence rapide pour éviter des retards.

6.5.4.2 Hypothèse principale

Le pic de *rapide* à $t \approx 10$ est probablement dû à une surcharge temporaire du nœud central, causée par une phase de mission intensive ou un traitement de données complexes. La

topologie centralisée (où le nœud central est le seul à communiquer avec la station de base) exerce une pression importante sur ce nœud, le forçant à augmenter sa cadence pour répondre aux exigences, même si Nbt reste modéré. Le modèle RBD actuel, qui ne modélise pas explicitement ces facteurs (type de données, densité, phase de mission), sous-estime leur impact sur Cft .

6.6 Limites et perspectives :

- Les hypothèses simplificatrices (batterie neuve, météo idéale) limitent la généralisation.
- Le pic de rapide $t \approx 10$ (Figure 39) révèle la nécessité d'intégrer des variables comme le type de données (Tdt) ou la phase de mission (Pmt) pour mieux modéliser Cft .
- La topologie centralisée VSEPR-VBCA, où le nœud central est surchargé, amplifie les risques de défaillance, suggérant l'exploration d'une reconfiguration dynamique (ex. : algorithme VBCA amélioré).
- La **Figure 37** montre que les interventions réduisent temporairement $P(Dt=oui)$, mais une gestion proactive est nécessaire.

En conclusion, le modèle RBD est robuste pour prédire les défaillances dans les FANET, mais il doit être étendu pour inclure des facteurs comme le type de données, les phases de mission, et des mécanismes de reconfiguration dynamique.

6.7 Diagramme d'influence et analyse quantitative

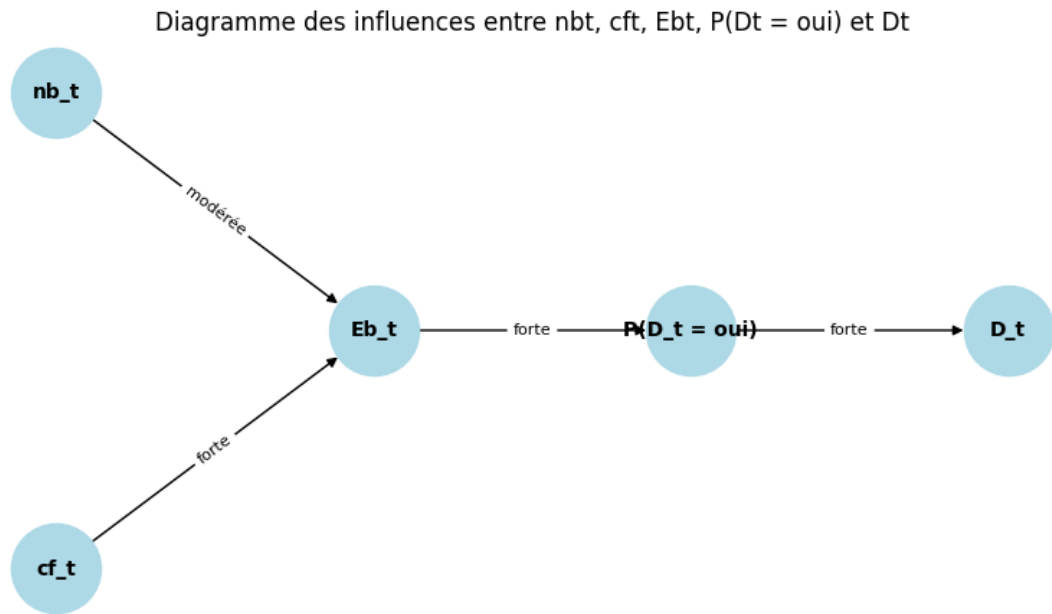


Figure 40 Diagramme d'influence

Le diagramme est un flux unidirectionnel de Nbt et Cft vers Ebt , puis vers $P(Dt = oui)$ et Dt , avec une interaction notable entre Nbt et Cft . Pour faire une analyse quantitative, nous avons calculer les coefficients de Pearson entre les variables pour analyser leur relation linéaire. Ces données sont les données simulées des variables.

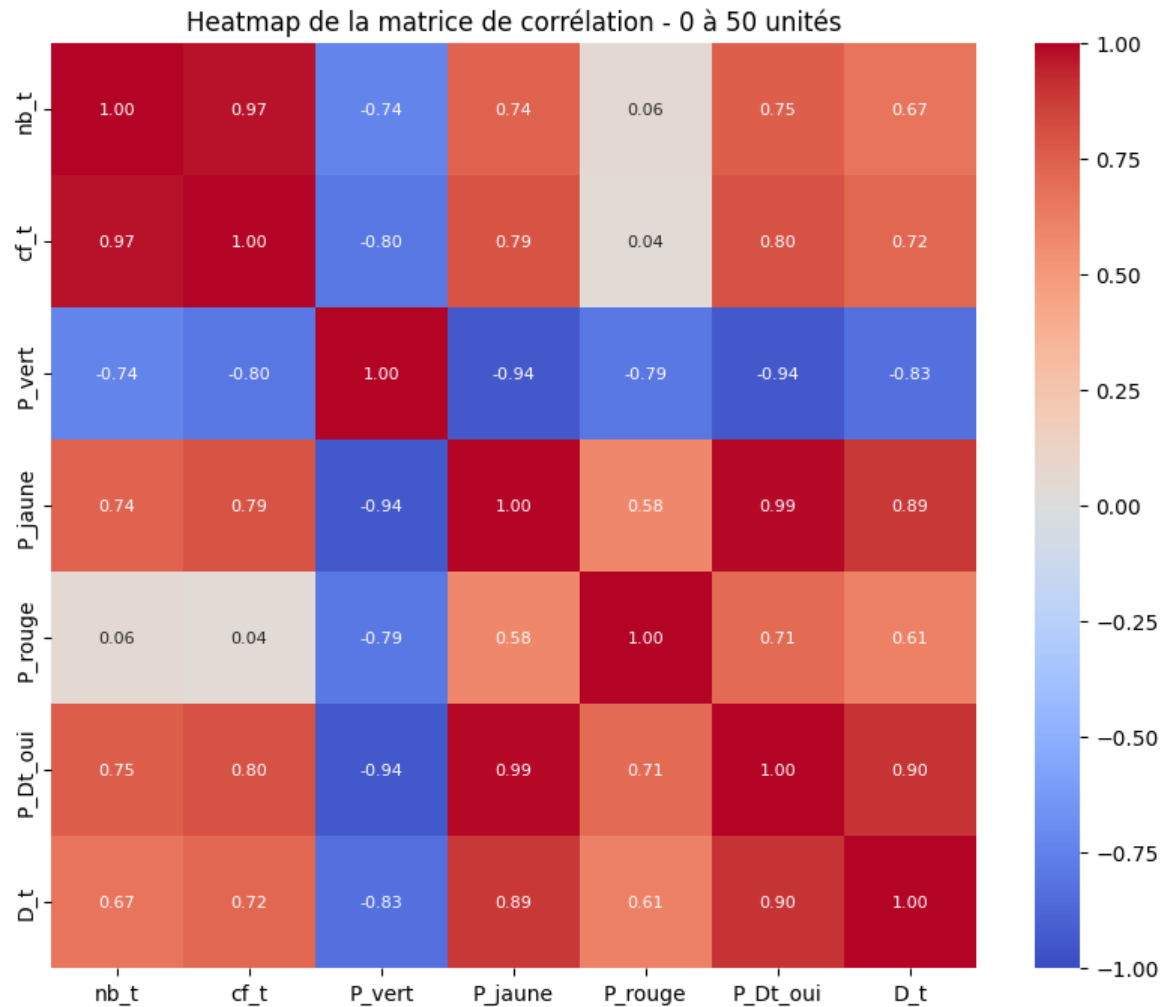


Figure 41 Carte thermique sur 0-50

La carte thermique illustre les relations linéaires entre Nbt , Cft , $P(vert)$, $P(jaune)$, $P(rouge)$, $P(Dt=oui)$, et Dt sur la période 0 à 50 unités. Une corrélation positive très forte (0.97) entre Nbt et Cft reflète leur évolution synchronisée, avec des pics à 0,7 et 0,8 pendant la perturbation ($t=35$ à $t=43$). Cft présente une corrélation positive forte avec $P(jaune)$ (0.79) et $P(Dt=oui)$ (0.80), soulignant son rôle dans la dégradation de Ebt . Une corrélation négative modérée à forte (-0.80) avec $P(vert)$ indique qu'une cadence élevée réduit l'état sain de la batterie.

Les proportions de Ebt montrent une corrélation négative très forte entre $P(vert)$ et $P(jaune)$ (-0.94), ainsi qu'avec $P(rouge)$ (-0.79), due à leur somme contrainte à 1. $P(jaune)$ et $P(rouge)$ ont une corrélation positive modérée (0.58). $P(Dt=oui)$ est très fortement corrélé avec $P(jaune)$ (0.99) et négativement avec $P(vert)$ (-0.94), cohérent avec leurs poids dans le calcul. Dt est fortement corrélé avec $P(Dt=oui)$ (0.90) et $P(jaune)$ (0.89), et modérément avec Cft (0.72) et Nbt (0.67).

6.8 Validation avec régression logistique et XGBoost

Puisque Dt est une variable binaire (0 ou 1), une régression logistique est plus appropriée que la régression linéaire pour modéliser sa relation avec les variables explicatives Nbt , Cft , et Ebt (via $P(vert)$, $P(jaune)$, $P(rouge)$) ainsi que les interactions $Nbt \cdot Cft$, $Nbt \cdot Ebt$ et $Cft \cdot Ebt$. L'objectif est de prédire la probabilité $P(Dt = 1)$ en fonction de ces variables, puis d'appliquer un seuil pour classer Dt . Nous allons construire un modèle logistique en utilisant $P(Dt = oui)$ comme proxy principal (puisque Dt est dérivé de celui-ci avec un seuil de $0,35$), mais en incluant aussi Nbt , Cft et Ebt comme prédicteurs pour évaluer leur impact direct.

Plan de la régression logistique

La régression logistique modélise la probabilité $P(D_t = 1/X)$ (probabilité de défaillance) sous la forme :

Équation 12 Régression logistique

$$P(D_t = 1/X) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Ou $z = \beta_0 + \beta_{1x_1} + \beta_{2x_2} + \dots + \beta_{n \times n}$, β_0 est l'intercept et β_i sont les coefficients de la variable x_i

- *Modèle 1 : $Nbt, Cft, P(Dt = oui) \rightarrow Dt$*

Équation 13 Régression logistique avec les variables contextuelles

$$\log\left(\frac{P(D_t = 1)}{1 - P(D_t = 1)}\right) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Nbt + \beta_2 \cdot Cft + \beta_3 \cdot P(D_t = 1) + \varepsilon$$

L'objectif avec cette équation est d'évaluer comment Nbt , Cft , et la probabilité continue influencent Dt

- *Modèle 2 : $P(vert), P(jaune), P(rouge) \rightarrow Dt$*

Équation 14 États de la batterie

$$\log\left(\frac{P(D_t=1)}{1-P(D_t=1)}\right) = \beta_0 + \beta_1 \cdot P(vert) + \beta_2 \cdot P(jaune) + \beta_3 \cdot P(rouge) + \varepsilon$$

Objectif : Vérifier si les états de la batterie seuls peuvent prédire Dt (en lien avec $P(Dt = oui)$)

- *Modèle 3 : $Nbt, Cft, P(Dt = oui), P(vert), P(jaune), P(rouge), Nbt \cdot Cft, Nbt \cdot Ebt$ et $Cft \cdot Ebt \rightarrow Dt$*

Équation 15 Capture de la synergie des termes $Nbt \cdot Cft$, $Nbt \cdot Ebt$ et $Cft \cdot Ebt$

$$\begin{aligned} z = & \beta_0 + \beta_1 \cdot Nbt + \beta_2 \cdot Cft + \beta_3 \cdot P(vert) + \beta_4 \cdot P(jaune) + \beta_5 \cdot P(rouge) \\ & + \beta_6 \cdot P(D_t = 1) + \beta_7 \cdot P(Nbt \cdot Cft) + \beta_8 \cdot P(Nbt \cdot Ebt) + \beta_9 \\ & \cdot P(Cft \cdot Ebt) \end{aligned}$$

Le terme $Nbt \cdot Cft$ permet de capturer la synergie entre le nombre de communication et la cadence de fonctionnement augmentant la probabilité de défaillance lorsque les deux variables augmentent simultanément.

Plan de XGBoost

XGBoost ou encore amplification du gradient, repose sur l'assemblage itératif d'arbres de décision, où chaque arbre corrige les erreurs des précédents en minimisant une fonction objective combinant une perte (comme la log loss pour la classification binaire) et un terme de régularisation pour prévenir le surajustement. Dans cette étude, il est employé pour modéliser la probabilité de la variable cible Dt en fonction des caractéristiques Nbt , Cft , Ebt , $P(verte)$, $P(jaune)$ et $P(rouge)$ avec des interactions spécifiques, permettant une analyse robuste et interprétable des données temporelles synthétiques.

Équation 16 *XGBoost* avec les synergies

$$P(y_i = 1 | Nbt_t, Cft_t, Ebt_t, P_{verte}, P_{jaune}, P_{rouge}, Nbt_t \cdot Cft_t, Nbt_t \cdot Ebt_t, Cft_t \cdot Ebt_t) = \frac{1}{1 + e^{-(\sum_{k=1}^K f_k(Nbt_t, Cft_t, Ebt_t, P_{verte}, P_{jaune}, P_{rouge}, Nbt_t \cdot Cft_t, Nbt_t \cdot Ebt_t, Cft_t \cdot Ebt_t))}}$$

Où K est le nombre d'arbres (déterminé par n_e estimateurs), f_k est le score prédit par l'arbre k , et les f_k sont des fonctions apprises à partir des données via un processus d'amplification de gradient.

6.9 Conditions de test

Pour évaluer les défaillances, les réseaux dynamiques bayésiens sont adaptés pour cette étape initiale car ils permettent de capturer les dynamiques temporelles des états de la batterie (par exemple, comment un état stable pouvait évoluer vers un état critique avec le temps) et

de fournir une première estimation probabiliste des défaillances. Ensuite, pour comprendre avec précision la synergie entre certaines variables, telles que le nombre de communications *Nbt* et la cadence de fonctionnement *Cft* une régression logistique a été appliquée sur l'ensemble des variables ainsi que la synergie entre *Nbt*, *Cft* et *Ebt* pour refléter la charge d'une communication élevée et une cadence de fonctionnement forte.

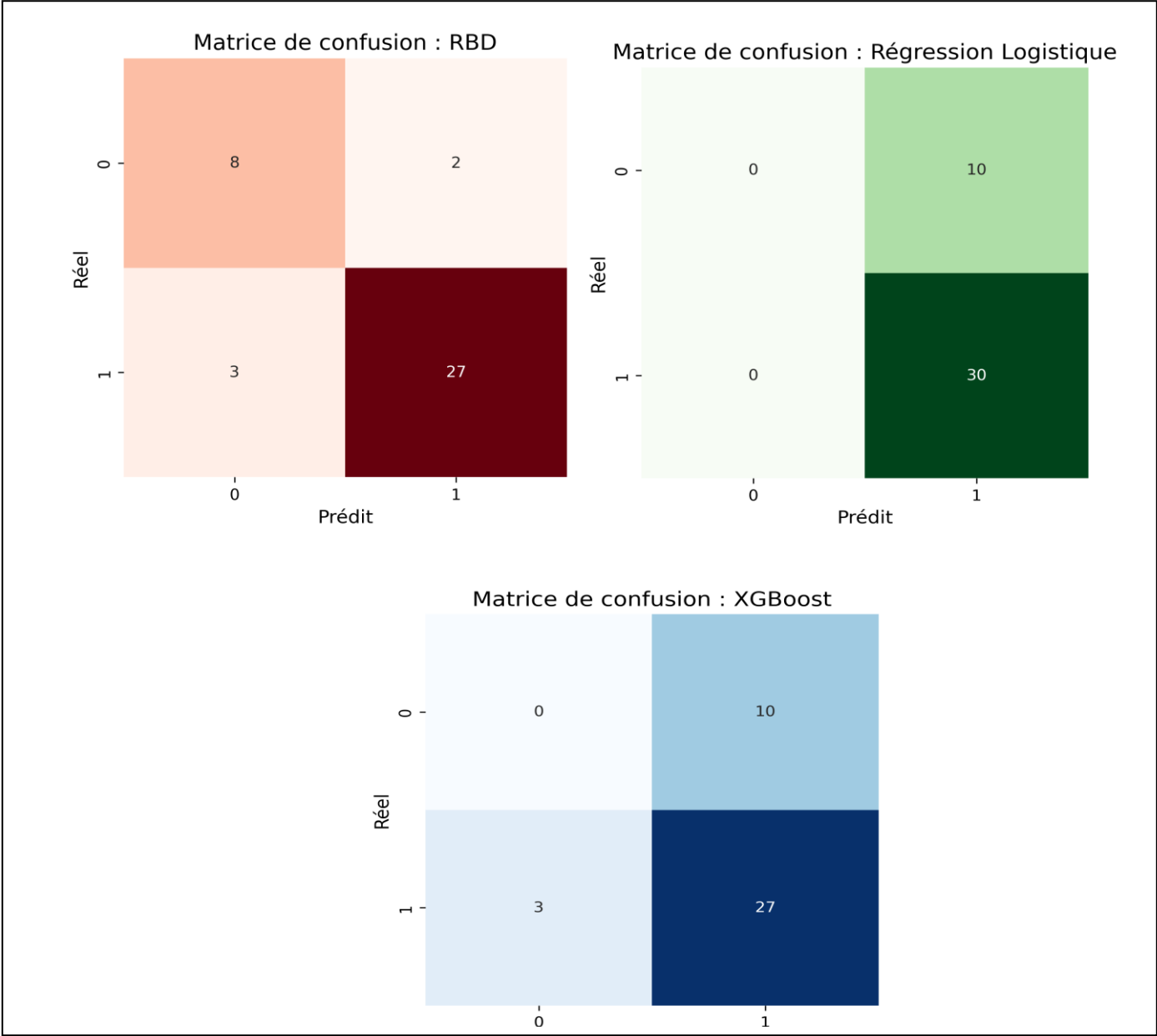


Figure 42 Différentes matrices de confusion

Les matrices de confusion de différents modèles (Figure 42) montrent les performances de chacun. La matrice de confusion des RBD par exemple est comme suit :

- **Vrais Négatifs VN (en haut à gauche)** : 8 cas où le modèle a correctement prédit la classe 0
- **Faux Positifs FP (en haut à droite)** : 2 cas où le modèle a prédit 1 alors que la valeur réelle était 0
- **Faux Négatifs FN (en bas à gauche)** : 3 cas où le modèle a prédit 0 alors que la valeur réelle était 1
- **Vrais Positifs VP (en bas à droite)** : 27 cas où le modèle a correctement prédit la classe 1

Les metrique pour les RBD sont les suivantes :

$$\textit{Précision} = \frac{VP}{VP+FP} = \frac{27}{27+2} = 0.93$$

$$\textit{Rappel} = \frac{VP}{VP+FN} = \frac{27}{27+3} = 0.90$$

$$\textit{Score F1} = 2 \cdot \frac{\textit{Précision} \cdot \textit{Rappel}}{\textit{Précision} + \textit{Rappel}} = 2 \cdot \frac{0.93 \cdot 0.9}{0.93 + 0.9} = 0.915$$

$$\textit{Taux d'erreur} = \frac{FP+FN}{\textit{Total}} = \frac{2+3}{40} = 0.125$$

Les matrices de confusion révèlent que RBD surpasse XGBoost et la Régression Logistique, avec un F1-score de 91.5 % contre 86.2 % et 82.8 %, respectivement. RBD excelle dans la prédiction de la classe 1 (rappel de 90 %) et maintient une précision élevée (93.1 %), grâce à sa conception spécifique intégrant des interactions explicites comme $nb\ t \cdot cft$. XGBoost, bien que robuste, montre un rappel plus faible (83.3 %) et plus d'erreurs (taux d'erreur de 20 %), tandis que la Régression Logistique, limitée par sa linéarité, obtient les pires résultats

(rappel de 80 %, taux d'erreur de 25 %). Ces résultats soulignent l'efficacité de RBD pour ce problème, mais XGBoost pourrait être amélioré avec un réglage plus fin et davantage de données.

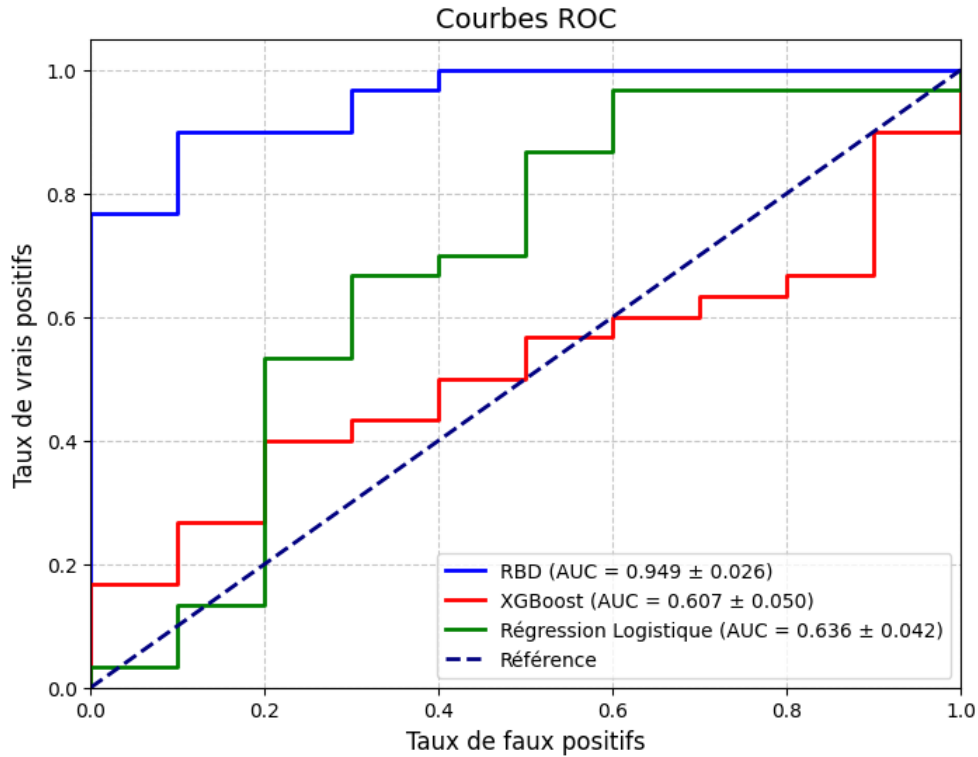


Figure 43 Courbe des modèles

Les courbes ROC montrent que RBD surpasse XGBoost et la Régression Logistique, avec un AUC (Area Under Curve) de 0.949 ± 0.026 , contre 0.607 ± 0.050 et 0.636 ± 0.042 , respectivement, reflétant une meilleure capacité de discrimination. Les probabilités prédites confirment cette tendance : RBD suit efficacement les valeurs réelles de Dt (effet mémoire via *synergy_factor* ou *memory_weight*), tandis que XGBoost présente une variabilité excessive mais sa calibration semble moins précise et LR des probabilités trop uniformes indiquant une incapacité à capturer les dynamiques non linéaires ou des données temporelles. Ces résultats, cohérents avec les matrices de confusion (F1-scores de 91.5 %, 86.2 %, et 82.8

%), soulignent l'avantage de RBD pour modéliser les dynamiques temporelles, bien que XGBoost puisse être amélioré par un réglage accru des hyperparamètres.

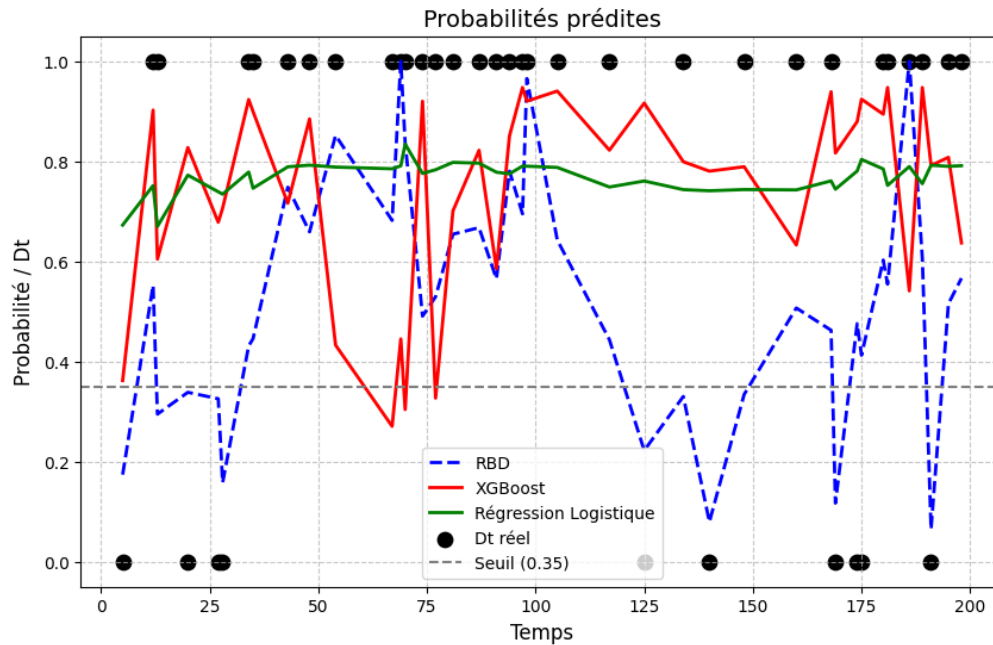


Figure 44 Comparaison de probabilités

La figure illustrant les probabilités prédites par les modèles RBD, XGBoost, et Régression Logistique (Figure 44) met en évidence leurs performances respectives sur les données temporelles synthétiques. L'axe des abscisses représente le temps (de 0 à 200 étapes), tandis que l'axe des ordonnées indique les probabilités prédites $P(Dt = 1)$, avec un seuil de classification fixé à 0.35. Les valeurs réelles de Dt (points noirs) montrent des transitions entre 0 et 1, reflétant la dynamique sous-jacente. Le modèle RBD présente des variations marquées qui suivent étroitement les transitions réelles, suggérant une bonne capture des effets temporels et des interactions, comme ceux intégrés via les facteurs de synergie et de mémoire. En revanche, XGBoost affiche des fluctuations importantes, avec des probabilités souvent extrêmes, indiquant une sensibilité aux seuils appris mais une calibration moins

précise. La Régression Logistique produit des probabilités plus stables et uniformes, centrées autour de 0.5-0.7, ce qui reflète sa nature linéaire et sa difficulté à modéliser les relations non linéaires ou temporelles complexes. Ces observations sont cohérentes avec les matrices de confusion et les courbes ROC, où RBD surpasse les autres modèles avec un F1-score de 91.5 % et un AUC de 0.949, contre 86.2 % et 0.607 pour XGBoost, et 82.8 % et 0.636 pour la Régression Logistique, soulignant son efficacité pour cette tâche spécifique.

Chapitre 7 - Conclusion et perspectives

7.1 Conclusion

Nous arrivons à la fin de ce projet, qui a exploré les réseaux FANET (Flying Ad-hoc Networks) et leurs complexités inhérentes. Ce domaine de recherche, encore relativement nouveau, souffre d'un manque de travaux approfondis et systématiques. Si les techniques pour faire voler un drone sont bien maîtrisées, celles dédiées à la gestion d'un réseau ad-hoc pour drones restent peu nombreuses et souvent non adaptées. Les approches développées pour les réseaux mobiles classiques (MANET) ne sont pas directement applicables aux FANET en raison de leurs spécificités, telles que la mobilité tridimensionnelle rapide, les contraintes énergétiques strictes, et les conditions environnementales variables.

Dans cet objectif, nous avons d'abord étudié la **topologie** des réseaux FANET, un élément clé pour assurer un contrôle efficace et permettre l'adaptation des techniques existantes. Nous nous sommes appuyés sur l'algorithme **VBCA** (dérivé de la théorie VSEPR, utilisée pour modéliser la géométrie des atomes dans l'espace) afin de structurer le réseau en

clusters. Chaque cluster est organisé autour d'un **nœud central**, analogue à l'atome central d'une molécule, entouré de nœuds périphériques. Cette approche semi-centralisée, appelée **VSEPR-VBCA**, permet de diviser le réseau en petites cellules facilement contrôlables, tout en facilitant l'adaptation des protocoles de communication existants. Les premiers tests ont démontré une **couverture spatiale** supérieure avec VBCA par rapport à d'autres méthodes, confirmant son efficacité pour structurer un FANET. Sur le plan communicationnel, l'utilisation de protocoles issus des réseaux mobiles a révélé la simplicité de mise en œuvre et l'efficacité de cette topologie.

Cependant, cette méthode semi-centralisée présente une limite majeure : la **fiabilité** et la **viabilité** du réseau dépendent fortement des nœuds centraux. La perte d'un nœud central entraîne la désorganisation du cluster associé, voire sa perte totale. Pour pallier ce problème, nous avons développé un **algorithme de récupération** des nœuds périphériques. En cas de défaillance d'un nœud central, une **reconfiguration dynamique** est effectuée : les clusters voisins intègrent les nœuds périphériques orphelins dans leur géométrie, préservant ainsi la continuité du réseau.

Au-delà des mécanismes de récupération, nous avons cherché à **optimiser** le réseau en introduisant des techniques de **prédiction des défaillances**. Cette phase s'est concentrée sur les causes principales de perte d'un nœud central, avec un focus particulier sur la **consommation énergétique**. Nous avons identifié plusieurs facteurs influençant la dégradation de la batterie (E_{bt}) : le **nombre de communications** (N_{bt}), la **cadence de fonctionnement** (C_{ft}), le **temps de vol** (T_t), ainsi que des conditions externes comme la **météo** (W_t), la **zone de survol** (Z_t), et la **position dans le réseau** ($Post$). En utilisant un

réseau dynamique bayésien (RBD), nous avons modélisé les dépendances entre ces paramètres pour prédire la probabilité de défaillance ($P(Dt=oui)$).

Les résultats montrent qu'une **cadence de fonctionnement rapide** ($Cft=rapide$) sur une période prolongée, combinée à un **nombre élevé de communications** ($Nbt=élevé$), augmente significativement la consommation d'énergie, menant à un risque élevé de perte du nœud central. L'intégration des variables externes a permis de mieux capturer les scénarios réels : une **météo défavorable** et une **zone de survol dangereuse**, associées à une position centrale ($Post=central$), aggravent la dégradation de la batterie, soulignant l'importance d'une gestion optimisée.

La gestion des communications des nœuds centraux est donc cruciale. Ces nœuds, dépourvus d'une énergie infinie et incapables d'être rechargés en vol pour l'instant, sont des points critiques du réseau. Une défaillance a non seulement un impact opérationnel (perte potentielle des nœuds périphériques et désorganisation du cluster), mais aussi un **impact financier** significatif, car la perte d'un cluster peut entraîner la perte de drones coûteux. Ce travail a permis de poser les bases d'une gestion proactive des FANET, combinant topologie robuste et prédiction des défaillances pour améliorer leur fiabilité.

7.2 Perspectives

À l'issue de ce travail de thèse, plusieurs perspectives d'amélioration et d'approfondissement peuvent être envisagées. Nous les divisons en plusieurs axes pour structurer les futures recherches.

1. Améliorations de la topologie (VBCA) :

L'algorithme VBCA a démontré des potentialités prometteuses pour structurer les FANET, notamment en termes de couverture et de simplicité de gestion. Cependant, une **étude comparative exhaustive** avec d'autres méthodes, telles que l'**optimisation par essaims particulaires (PSO)** ou l'**algorithme des colonies de fourmis (ACO)**, est nécessaire pour mieux évaluer ses performances. De plus, VBCA limite actuellement la taille des clusters à un nombre fixe de nœuds périphériques (12). Une modification de l'algorithme pour permettre une **augmentation dynamique de la taille des clusters** serait bénéfique, notamment dans des scénarios où la densité de drones varie. Enfin, un **mécanisme d'élection dynamique du nœud central** est une piste majeure. Dans ce travail, le nœud central est fixé statiquement, mais une élection en temps réel, basée sur des critères comme l'énergie restante ou la position géographique, pourrait réduire les risques de défaillance en alternant les rôles entre nœuds centraux et périphériques.

2. Optimisation de la gestion énergétique :

L'intégration de mécanismes de **gestion énergétique avancée** est une priorité. Par exemple, combiner l'élection dynamique du nœud central avec une **gestion adaptative de l'énergie** au sein des clusters (ex. : réduire C_{ft} en cas de météo défavorable ou de zone dangereuse) permettrait de prolonger la durée de vie des nœuds centraux. De plus, des

techniques de **récolte d'énergie** (energy harvesting), comme l'utilisation de panneaux solaires miniatures sur les drones, pourraient être explorées pour pallier les limites actuelles de recharge en vol.

3. Extension des réseaux dynamiques bayésiens (RBD) :

Les RBD se sont révélés être un outil puissant pour prédire les défaillances, mais leur portée peut être élargie. Actuellement focalisés sur la gestion énergétique (Ebt), ils pourraient être utilisés pour une **gestion globale du réseau**. Par exemple, en analysant l'**activité des nœuds centraux** et le **nombre de nœuds périphériques**, il serait possible de prédire les **régions d'intérêt** (zones critiques nécessitant plus de ressources) et d'adapter dynamiquement la topologie ou les communications. De plus, l'intégration de variables comme Wt , Zt , et $Post$ (section 6.1) a montré leur impact significatif sur $P(Dt=oui)$. Une **modélisation dynamique** de ces variables (ex. : transitions aléatoires pour Wt et Zt) permettrait de mieux capturer les variations environnementales. Enfin, l'ajout du **temps de séjour** dans un état donné (ex. : durée pendant laquelle $Ebt=jaune$) pourrait affiner les prédictions, mais cela nécessite un **retour d'expérience (REX)** pour calibrer les probabilités.

4. Validation expérimentale et prototypage :

Ce travail s'est appuyé sur des simulations, mais l'absence de REX limite la précision des probabilités à priori et des résultats. Un **prototypage réel** est indispensable pour valider les hypothèses, notamment sur les probabilités conditionnelles (ex. : impact de Wt sur Ebt). Des expérimentations en conditions réelles permettraient de recueillir des données pour affiner le modèle RBD et confirmer les performances de VBCA. Par exemple, des tests sur

un petit réseau de drones pourraient mesurer l'impact réel d'une météo défavorable ou d'une zone dangereuse sur la consommation énergétique.

5. Résilience et adaptation aux conditions externes :

Une piste d'amélioration consiste à développer des **stratégies d'adaptation** : par exemple, réduire automatiquement la cadence de fonctionnement (*Cft*) ou limiter les communications (*Nbt*) en cas de conditions défavorables. De plus, explorer des **topologies hybrides**, combinant VBCA avec des approches décentralisées, pourrait réduire la dépendance aux nœuds centraux et améliorer la résilience globale du réseau.

En résumé, ce travail a jeté les bases d'une gestion optimisée des FANET, en combinant une topologie efficace (VSEPR-VBCA) et des techniques de prédiction probabiliste (RBD). Les perspectives proposées offrent des axes concrets pour améliorer la fiabilité, la résilience, et l'efficacité énergétique des FANET, tout en ouvrant la voie à des validations expérimentales indispensables.

Bibliographie

- [1] J. George, P. B. Sujit, and J. B. Sousa, “Search strategies for multiple UAV search and destroy missions,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 61, no. 1–4, pp. 355–367, 2011, doi: 10.1007/s10846-010-9486-8.
- [2] C. Barrado, R. Meseguer, J. López, E. Pastor, E. Santamaria, and P. Royo, “Wildfire monitoring using a mixed air-ground mobile network,” *IEEE Pervasive Comput*, vol. 9, no. 4, pp. 24–32, 2010, doi: 10.1109/MPRV.2010.54.
- [3] Z. Sun, P. Wang, M. C. Vuran, M. A. Al-Rodhaan, A. M. Al-Dhelaan, and I. F. Akyildiz, “BorderSense: Border patrol through advanced wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 468–477, 2011, doi: 10.1016/j.adhoc.2010.09.008.
- [4] F. Jiang and A. L. Swindlehurst, “Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink,” *2010 IEEE Globecom Workshops, GC’10*, no. 1, pp. 1766–1770, 2010, doi: 10.1109/GLOCOMW.2010.5700245.
- [5] E. P. De Freitas *et al.*, “UAV relay network to support WSN connectivity,” *2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2010*, pp. 309–314, 2010, doi: 10.1109/ICUMT.2010.5676621.

- [6] A. Cho, J. Kim, S. Lee, and C. Kee, “Wind estimation and airspeed calibration using a UAV with a single-antenna GPS receiver and pitot tube,” *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 47, no. 1, pp. 109–117, 2011, doi: 10.1109/TAES.2011.5705663.
- [7] Y. Gao, F. Zhu, Y. Zhang, and S. Hu, “Wind estimation for UAV based on multi-sensor information fusion,” *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, vol. 32, no. 1, pp. 42–47, 2015.
- [8] Y. Wang, S. Zhou, H. Li, G. Zhu, and K. Wei, “Meteorological UAV pitot-static tube wind error source and sensitivity analysis,” in *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2011 - Proceedings*, 2011, pp. 1341–1344. doi: 10.1109/RSETE.2011.5964529.
- [9] E. Raju and P. Becker, “Multi-organisational coordination for disaster recovery: The story of post-tsunami Tamil Nadu, India,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 4, pp. 82–91, 2013, doi: 10.1016/j.ijdr.2013.02.004.
- [10] H. Bendea, P. Boccardo, S. Dequal, F. G. Tonolo, D. Marenchino, and M. Piras, “Low cost UAV for post-disaster assessment,” *Proceedings of The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Beijing China 311 July 2008*, vol. XXXVII, pp. 1373–1380, 2008.
- [11] I. Maza, F. Caballero, J. Capitán, J. R. Martínez-De-Dios, and A. Ollero, “Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications,” in *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2011, pp. 563–585. doi: 10.1007/s10846-010-9497-5.

- [12] “Une croissance proche de 20 % sur le marché des drones.” Accessed: Sep. 27, 2017. [Online]. Available: <http://www.mesures.com/vision-industrielle/item/13721-une-croissance-proche-de-20-sur-le-marche-des-drones>
- [13] “Small Drones Market Size, Growth, Trend and Forecast to 2025 | MarketsandMarkets.” Accessed: May 25, 2020. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/small-uav-market-141134567.html>
- [14] “Twitter Acquires Personalized Email Marketing Provider RestEngine,” *Techcrunch*, May 2012, Accessed: Jul. 06, 2020. [Online]. Available: <https://techcrunch.com/2012/05/10/twitter-acquires-restengine/>
- [15] O. K. Sahingoz, “Ad Hoc Networks Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey,” vol. 11, pp. 1254–1270, 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004.
- [16] W. Zafar and B. Muhammad Khan, “Flying Ad-Hoc Networks: Technological and Social Implications,” *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 35, no. 2, pp. 67–74, 2016, doi: 10.1109/MTS.2016.2554418.
- [17] V. Sharma and R. Kumar, “Cooperative frameworks and network models for flying ad hoc networks: a survey,” *Concurrency Computation* , vol. 29, no. 4, 2017, doi: 10.1002/cpe.3931.
- [18] Qixing Feng, J. McGeehan, E. K. Tameh, and A. R. Nix, “Path Loss Models for Air-to-Ground Radio Channels in Urban Environments,” in *2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*, IEEE, pp. 2901–2905. doi: 10.1109/VETECS.2006.1683399.

- [19] S. Temel and I. Bekmezci, “Scalability analysis of Flying Ad Hoc Networks (FANETs): A directional antenna approach,” *2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, BlackSeaCom 2014*, pp. 185–187, 2014, doi: 10.1109/BlackSeaCom.2014.6849036.
- [20] “5 Small Unmanned Products to Watch This Year | Lockheed Martin.” Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2021/5-small-unmanned-products-to-watch-this-year.html>
- [21] “Indago 3 - UAV | Lockheed Martin.” Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/indago-vtol-uav.html>
- [22] “Spy’Ranger mini-UAV systems | Thales Group.” Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/land-forces/augmented-soldier/soldier-optronics/spyranger-mini-uav>
- [23] “Drone autonome à voilure tournante | Thales Group.” Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.thalesgroup.com/fr/drone-autonome-voilure-tournante>
- [24] “CAMCOPTER® S-100 - Schiebel.” Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://schiebel.net/products/camcopter-s-100/>
- [25] “HermesTM StarLiner | Elbit Systems.” Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://elbitsystems.com/product/hermes-starliner/>
- [26] “Skylark 3 Hybrid | Elbit Systems.” Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://elbitsystems.com/product/skylark-3-hybrid/>

- [27] “Skystriker | Elbit Systems.” Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: <https://elbitsystems.com/product/skystriker/>
- [28] “Naval Group conduira une étude sur un système de drone sous-marin de combat | Naval Group.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.naval-group.com/fr/naval-group-conduira-une-etude-sur-un-systeme-de-drone-sous-marin-de-combat>
- [29] “Marlin | Lockheed Martin.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/marlin.html>
- [30] “MATRIX™ Technology | Lockheed Martin.” Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/sikorsky-matrix-technology.html>
- [31] “Unmanned Military Case Study-Have Raider Demo | Lockheed Martin.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems/unmanned-military-case-study-have-raider-demo.html>
- [32] “Agras T16 - DJI.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.dji.com/ca/t16>
- [33] “Drone agricole XAG P100 : Gestion de précision des cultures - Agtecher : Blog pour la technologie agricole.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://agtecher.com/fr/produit/xag-p100-agricultural-drone/>
- [34] “Lois sur les drones au Népal.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://ts2.space/fr/lois-sur-les-drones-au-nepal/#gsc.tab=0>

- [35] “Test de drones pour des opérations après une catastrophe aux Philippines | Internet Society Foundation.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.isocfoundation.org/fr/story/test-de-drones-pour-des-operations-apres-une-catastrophe-aux-philippines/>
- [36] “Séisme d’Al Haouz : Sauvetage de 5 bergers pris au piège dans une zone montagneuse à l’aide d’un drone - Le Matin.ma.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://lematin.ma/express/2023/seisme-sauvetage-5-bergers-pris-piege-zone-montagneuse/394265.html>
- [37] Z. S.- ICI.Radio-Canada.ca, “Plusieurs vies sauvées grâce à un drone acheté par un service de pompiers volontaires | Radio-Canada.ca”, Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1976793/urgence-sauvetage-riviere-pompiers-technologie>
- [38] “Amazon se prépare à livrer par drones | TVA Nouvelles.” Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.tvanouvelles.ca/2022/06/13/amazon-se-prepare-a-livrer-par-drones>
- [39] “Thales et Schiebel franchissent avec succès les tests d’acceptation en usine pour le programme Peregrine du ministère de la défense britannique, ouvrant ainsi la voie aux premières livraisons | Thales Group.” Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.thalesgroup.com/fr/monde-defense/unmanned-aerial-vehicles-systems/news/thales-et-schiebel-franchissent-succes-tests>
- [40] “Kettering Bug — Wikipédia.” Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Kettering_Bug

- [41] “Archibald M. Low - New Mexico Museum of Space History.” Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.nmspacemuseum.org/inductee/archibald-m-low/>

- [42] “An Early Pilotless Aircraft | Naval History Magazine - August 2019 Volume 33, Number 4.” Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.usni.org/magazines/naval-history-magazine/2019/august/early-pilotless-aircraft>

- [43] “Historique du drone - photos vidéos aériennes.” Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.ulm31.fr/ulm-toulouse/photos-videos-aeriennes-drone-toulouse/historique-du-drone.html>

- [44] “DRONES : Histoire des drones - Encyclopædia Universalis.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/drones/2-histoire-des-drones/>

- [45] “Global MALE & HALE UAV Key Developments Across Global Top 10 Defence Spenders - European Security & Defence.” Accessed: Jan. 13, 2024. [Online]. Available: <https://euro-sd.com/2023/01/articles/26779/global-male-hale-uav-key-developments-across-global-top-10-defence-spenders/>

- [46] C. W. Reynolds, “Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model,” *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987*, vol. 21, no. 4, pp. 25–34, Aug. 1987, doi: 10.1145/37401.37406.

- [47] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory," *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 51, no. 3, pp. 401–420, Mar. 2006, doi: 10.1109/TAC.2005.864190.
- [48] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: Part I," *IEEE Robot Autom Mag*, vol. 13, no. 2, pp. 99–108, Jun. 2006, doi: 10.1109/MRA.2006.1638022.
- [49] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 4, no. 2, pp. 100–107, 1968, doi: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [50] S. Karaman and E. Frazzoli, "Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning," May 2011, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1105.1186>
- [51] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [52] S. R. Dalal, E. B. Fowlkes, and B. Hoadley, "Risk Analysis of the Space Shuttle: Pre-Challenger Prediction of Failure," *J Am Stat Assoc*, vol. 84, no. 408, pp. 945–957, 1989, doi: 10.1080/01621459.1989.10478858.
- [53] R. Isermann, "Model-based fault-detection and diagnosis - Status and applications," *Annu Rev Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005, doi: 10.1016/j.arcontrol.2004.12.002.

- [54] R. Isermann, "Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods — An introduction," *Control Eng Pract*, vol. 5, no. 5, pp. 639–652, May 1997, doi: 10.1016/S0967-0661(97)00046-4.
- [55] S. PIECHOWIAK, "Intelligence artificielle et diagnostic," *Ref: TIP085WEB - "Industrie du futur,"* Dec. 2003, doi: 10.51257/A-V1-S7217.
- [56] M. R. Brust, M. I. Akbas, and D. Turgut, "VBCA: A virtual forces clustering algorithm for autonomous aerial drone systems," *10th Annual International Systems Conference, SysCon 2016 - Proceedings*, 2016, doi: 10.1109/SYSCON.2016.7490517.
- [57] M. İlhan Akbaş, G. Solmaz, and D. Turgut, "Molecular geometry inspired positioning for aerial networks," *Computer Networks*, vol. 98, no. February, pp. 72–88, 2016, doi: 10.1016/j.comnet.2016.02.001.
- [58] M. I. Akbaş and D. Turgut, "Lightweight routing with dynamic interests in wireless sensor and actor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 8, pp. 2313–2328, 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2013.05.012.
- [59] S. Lee and M. Younis, "Optimized relay node placement for connecting disjoint wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 56, no. 12, pp. 2788–2804, 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.04.019.
- [60] M. I. Akbaş and D. Turgut, "Lightweight routing with dynamic interests in wireless sensor and actor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 8, pp. 2313–2328, 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2013.05.012.

- [61] S. Lee and M. Younis, "Optimized relay node placement for connecting disjoint wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 56, no. 12, pp. 2788–2804, 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.04.019.
- [62] M. I. Akbas and D. Turgut, "Lightweight Routing with QoS Support in Wireless Sensor and Actor Networks," *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, no. December, pp. 1–5, 2010, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684039.
- [63] I. Hargittai and B. Chamberland, "The VSEPR model of molecular geometry," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 12, no. 3–4, pp. 1021–1038, 1986, doi: 10.1016/0898-1221(86)90438-4.
- [64] "Stereochemical types and valency groups." [Online]. Available: <https://royalsocietypublishing.org/>
- [65] R. J. Gillespie, "The electron-pair repulsion model for molecular geometry," *J Chem Educ*, vol. 47, no. 1, p. 18, Jan. 1970, doi: 10.1021/ed047p18.
- [66] R. J. Gillespie, "The electron-pair repulsion model for molecular geometry," *J Chem Educ*, vol. 47, no. 1, p. 18, Jan. 1970, doi: 10.1021/ed047p18.
- [67] R. J. Gillespie and E. A. Robinson, "Gilbert N. Lewis and the chemical bond: The electron pair and the octet rule from 1916 to the present day," *J Comput Chem*, vol. 28, no. 1, pp. 87–97, Jan. 2007, doi: 10.1002/JCC.20545.
- [68] "Chapter 6: Molecular Structures – Chemistry 109." Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <https://wisc.pb.unizin.org/chem109/chapter/ch-6/>
- [69] J. Moore, J. Zhou, and E. Garand, "Chapter 6: Molecular Structures."

- [70] “LA GEOMETRIE DES MOLECULES.” Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <http://www.chimie-briere.com/cvsepr/vsepr.htm>
- [71] M. Ilhan Akbaş, G. Solmaz, and D. Turgut, “Molecular geometry inspired positioning for aerial networks,” *Computer Networks*, vol. 98, no. February, pp. 72–88, 2016, doi: 10.1016/j.comnet.2016.02.001.
- [72] “OMNeT++ Discrete Event Simulator.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: <https://omnetpp.org/>
- [73] J. Elston and E. W. Frew, “Hierarchical distributed control for search and tracking by heterogeneous aerial robot networks,” *Proc IEEE Int Conf Robot Autom*, pp. 170–175, 2008, doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543204.
- [74] S. Morgenthaler, T. Braun, Z. Zhao, T. Staub, and M. Anwander, “UAVNet: A mobile wireless mesh network using Unmanned Aerial Vehicles,” *2012 IEEE Globecom Workshops*, pp. 1603–1608, 2012, doi: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477825.
- [75] M. I. Akbaş and D. Turgut, “APAWSAN: Actor positioning for aerial wireless sensor and actor networks,” *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN*, pp. 563–570, 2011, doi: 10.1109/LCN.2011.6115518.
- [76] C. Luo, S. McClean, and G. Parr, “UAV Position Estimation and Collision Avoidance using the Extended Kalman Filter,” *IEEE Transactions on ...*, 2013, [Online]. Available: <http://eprints.ulster.ac.uk/24746/>
- [77] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, “3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal

- Coverage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 434–437, Aug. 2017, doi: 10.1109/LWC.2017.2700840.
- [78] D. N. M. Hoang, J. M. Rhee, and S. Y. Park, “Fault-Tolerant Ad Hoc On-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 111337–111350, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3216066.
- [79] I. P. De Medeiros, L. R. Rodrigues, S. A. Embraer, and R. Santos, “PHM-Based Multi-UAV Task Assignment,” pp. 2–9.
- [80] C. Zang and S. Zang, “Mobility prediction clustering algorithm for UAV networking,” *2011 IEEE GLOBECOM Workshops, GC Wkshps 2011*, no. 3, pp. 1158–1161, 2011, doi: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162360.
- [81] D. Y. Kim and J. W. Lee, “Integrated Topology Management in Flying Ad Hoc Networks: Topology Construction and Adjustment,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61196–61211, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875679.
- [82] D. Y. Kim and J. W. Lee, “Joint Mission Assignment and Location Management for UAVs in Mission-critical Flying Ad Hoc Networks,” *9th International Conference on Information and Communication Technology Convergence: ICT Convergence Powered by Smart Intelligence, ICTC 2018*, pp. 323–328, 2018, doi: 10.1109/ICTC.2018.8539355.
- [83] B. Perabathini, K. Tummuri, A. Agrawal, and V. S. Varma, “Efficient 3D placement of UAVs with QoS assurance in Ad Hoc wireless networks,” *Proceedings - International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN*, vol. 2019-July, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICCCN.2019.8846947.

- [84] F. Wang, Z. Chen, J. Zhang, C. Zhou, and W. Yue, "Greedy forwarding and limited flooding based routing protocol for UAV flying Ad-Hoc networks," *ICEIEC 2019 - Proceedings of 2019 IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, no. 9, pp. 380–383, 2019, doi: 10.1109/ICEIEC.2019.8784505.
- [85] A. T. Hafez, A. J. Marasco, S. N. Givigi, M. Iskandarani, S. Yousefi, and C. A. Rabbath, "Solving Multi-UAV Dynamic Encirclement via Model Predictive Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 2251–2265, Nov. 2015, doi: 10.1109/TCST.2015.2411632.
- [86] M. R. Brust and B. M. Strimbu, "A Networked Swarm Model for UAV Deployment in the Assessment of Forest Environments," Jul. 2016, doi: 10.1109/ISSNIP.2015.7106967.
- [87] M. R. Brust, M. I. Akbas, and D. Turgut, "VBCA: A virtual forces clustering algorithm for autonomous aerial drone systems," *10th Annual International Systems Conference, SysCon 2016 - Proceedings*, 2016, doi: 10.1109/SYSCON.2016.7490517.
- [88] M. Dumiak, "Robocopters unite!," *IEEE Spectr*, vol. 46, no. 2, p. 12, 2009, doi: 10.1109/MSPEC.2009.4770596.
- [89] D. G. Reina, H. Tawfik, and S. L. Toral, "Multi-subpopulation evolutionary algorithms for coverage deployment of UAV-networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 68, pp. 16–32, 2018, doi: 10.1016/j.adhoc.2017.09.005.

- [90] Z. Deng, C. Ma, and M. Zhu, “A reconfigurable flight control system architecture for small unmanned aerial vehicles,” in *SysCon 2012 - 2012 IEEE International Systems Conference, Proceedings*, 2012, pp. 75–78. doi: 10.1109/SysCon.2012.6189451.
- [91] M. D. Mahamat, A. O. Dahmane, and F. Domingue, “Measurement of Air-Ground link over Virtual Forces Algorithm for Autonomous Aerial Drone Systems, VBCA,” in *2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems, ICCCS 2018*, 2018. doi: 10.1109/CCOMS.2018.8463275.
- [92] J. Pearl, “BOOK - Pearl - Probabilistic reasoning in intelligent systems: : networks of plausible inference (Morgan kaufmann series in representation and reasoning),” *Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, Calif.*, p. 552, 1988, Accessed: Jul. 13, 2024. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Probabilistic_Reasoning_in_Intelligent_S.htm?hl=fr&id=AvNID7LyMusC
- [93] J. Pearl, “From Bayesian Networks to Causal Networks,” *Mathematical Models for Handling Partial Knowledge in Artificial Intelligence*, pp. 157–182, 1995, doi: 10.1007/978-1-4899-1424-8_9.
- [94] A. Becker, D. Geiger, and A. A. Schäffer, “Automatic Selection of Loop Breakers for Genetic Linkage Analysis,” *Hum Hered*, vol. 48, no. 1, pp. 49–60, Feb. 1998, doi: 10.1159/000022781.
- [95] F. R. Bach and M. I. Jordan, “Discriminative training of hidden Markov models for multiple pitch tracking,” *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics*,

- Speech and Signal Processing - Proceedings*, vol. V, 2005, doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416347.
- [96] D. Heckerman, D. Geiger, and D. M. Chickering, "Learning Bayesian networks: The combination of knowledge and statistical data," *Machine Learning 1995* 20:3, vol. 20, no. 3, pp. 197–243, Sep. 1995, doi: 10.1007/BF00994016.
- [97] D. Heckerman, "A Tutorial on Learning with Bayesian Networks," *Learning in Graphical Models*, pp. 301–354, 1998, doi: 10.1007/978-94-011-5014-9_11.
- [98] D. Heckerman, C. Meek, and G. Cooper, "A Bayesian Approach to Causal Discovery," *Innovations in Machine Learning*, pp. 1–28, May 2006, doi: 10.1007/3-540-33486-6_1.
- [99] D. Heckerman, C. Meek, and G. Cooper, "A Bayesian Approach to Causal Discovery," 1997.
- [100] E. J. Yannakoudakis, ACM Digital Library., and Association for Computing Machinery. Special Interest Group on Information Retrieval., *Proceedings of the 23rd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. ACM, 2000.
- [101] I. Androutsopoulos, J. Koutsias, K. V Chandrinos, G. Paliouras, and C. D. Spyropoulos, "An Evaluation of Naive Bayesian Anti-Spam Filtering," 2000. [Online]. Available: <http://www.cauce.org>,
- [102] Y. Yue and S. Elfayoumy, "Anti-spam filtering using neural networks and Bayesian classifiers," *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on*

- Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA 2007*, pp. 272–278, 2007, doi: 10.1109/CIRA.2007.382929.
- [103] I. Androutsopoulos, J. Koutsias, K. Chandrinos, G. Paliouras, and C. D. Spyropoulos, “An evaluation of Naive Bayesian anti-spam filtering,” *CoRR*, vol. cs.CL/0006013, 2000, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/cs/0006013>
- [104] A. H. Marshall, L. A. Hill, and F. Kee, “Continuous Dynamic Bayesian networks for predicting survival of ischaemic heart disease patients,” *Proc IEEE Symp Comput Based Med Syst*, pp. 178–183, 2010, doi: 10.1109/CBMS.2010.6042637.
- [105] M. Molinari, A. Cremaschi, M. De Iorio, N. Chaturvedi, A. Hughes, and T. Tillin, “Bayesian dynamic network modelling: an application to metabolic associations in cardiovascular diseases,” *J Appl Stat*, vol. 51, no. 1, pp. 114–138, 2024, doi: 10.1080/02664763.2022.2116746.
- [106] M. A. J. van Gerven, B. G. Taal, and P. J. F. Lucas, “Dynamic Bayesian networks as prognostic models for clinical patient management,” *J Biomed Inform*, vol. 41, no. 4, pp. 515–529, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.jbi.2008.01.006.
- [107] M. A. J. van Gerven, B. G. Taal, and P. J. F. Lucas, “Dynamic Bayesian networks as prognostic models for clinical patient management,” *J Biomed Inform*, vol. 41, no. 4, pp. 515–529, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.JBI.2008.01.006.
- [108] A. Onisko, M. J. Druzdzel, and R. M. Austin, “Application of Bayesian network modeling to pathology informatics,” *Diagn Cytopathol*, vol. 47, no. 1, pp. 41–47, Jan. 2019, doi: 10.1002/DC.23993.

- [109] L. Peelen, N. F. de Keizer, E. de Jonge, R. J. Bosman, A. Abu-Hanna, and N. Peek, “Using hierarchical dynamic Bayesian networks to investigate dynamics of organ failure in patients in the Intensive Care Unit,” *J Biomed Inform*, vol. 43, no. 2, pp. 273–286, Apr. 2010, doi: 10.1016/J.JBI.2009.10.002.
- [110] K. Orphanou, A. Stassopoulou, and E. Keravnou, “DBN-extended: A dynamic Bayesian network model extended with temporal abstractions for coronary heart disease prognosis,” *IEEE J Biomed Health Inform*, vol. 20, no. 3, pp. 944–952, May 2016, doi: 10.1109/JBHI.2015.2420534.
- [111] A. Zandonà, R. Vasta, A. Chiò, and B. Di Camillo, “A Dynamic Bayesian Network model for the simulation of Amyotrophic Lateral Sclerosis progression,” *BMC Bioinformatics*, vol. 20, Apr. 2019, doi: 10.1186/s12859-019-2692-x.
- [112] C. Li, S. MahaDeVan, Y. Ling, S. Choze, and L. Wang, “Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin,” *AIAA Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 930–941, 2017, doi: 10.2514/1.J055201.
- [113] S. Ferreiro, A. Arnaiz, B. Sierra, and I. Irigoien, “Application of Bayesian networks in prognostics for a new Integrated Vehicle Health Management concept,” *Expert Syst Appl*, vol. 39, no. 7, pp. 6402–6418, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2011.12.027.
- [114] F. Ansari, R. Glawar, and W. Sihni, “Prescriptive Maintenance of CPPS by Integrating Multimodal Data with Dynamic Bayesian Networks,” pp. 1–8, 2020, doi: 10.1007/978-3-662-59084-3_1.
- [115] J. Hu, L. Zhang, L. Ma, and W. Liang, “An integrated safety prognosis model for complex system based on dynamic Bayesian network and ant colony algorithm,”

- Expert Syst Appl*, vol. 38, no. 3, pp. 1431–1446, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.ESWA.2010.07.050.
- [116] J. Hu, L. Zhang, Z. Cai, Y. Wang, and A. Wang, “Fault propagation behavior study and root cause reasoning with dynamic Bayesian network based framework,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 97, pp. 25–36, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.PSEP.2015.02.003.
- [117] B. Cai *et al.*, “Resilience evaluation methodology of engineering systems with dynamic-Bayesian-network-based degradation and maintenance,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 209, p. 107464, May 2021, doi: 10.1016/J.RESS.2021.107464.
- [118] C. Gao, Y. Guo, M. Zhong, X. Liang, H. Wang, and H. Yi, “Reliability analysis based on dynamic Bayesian networks: A case study of an unmanned surface vessel,” *Ocean Engineering*, vol. 240, p. 109970, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.109970.
- [119] L. Portinale, D. C. Raiteri, and S. Montani, “Supporting reliability engineers in exploiting the power of Dynamic Bayesian Networks,” *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 51, no. 2, pp. 179–195, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.ijar.2009.05.009.
- [120] V. P. Pavlović, J. M. Rehg, T.-J. Cham, and K. P. Murphy, “A Dynamic Bayesian Network Approach to Figure Tracking Using Learned Dynamic Models,” 1999.
- [121] J. Pearl, D. Mackenzie, and L. R. Goldberg, “The Book of Why: The New Science of Cause and Effect†,” *Quant Finance*, vol. 19, no. 12, pp. 1945–1949, Dec. 2019, doi: 10.1080/14697688.2019.1655928.

- [122] J. M. Rulnick and N. Bambos, "Mobile power management for maximum battery life in wireless communication networks," *Proceedings - IEEE INFOCOM*, vol. 2, pp. 443–450, 1996, doi: 10.1109/INFOCOM.1996.493310.
- [123] S. Chandra, "Digital Object Identifier (Multimedia Systems Wireless network interface energy consumption Implications for popular streaming formats," *Multimed Syst*, vol. 9, pp. 185–201, 2003, doi: 10.1007/s00530-003-0089-0.
- [124] N. Ramzan, ACM Digital Library., ACM Special Interest Group on Multimedia, Association for Computing Machinery, and Ariz.) ACM International Conference on Multimedia (2011 : Scottsdale, *SBNMA '11 : proceedings of the 2011 ACM Workshop on Social and Behavioural Networked Media Access*.
- [125] P. Simoens *et al.*, "IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, ACCEPTED FOR PUBLICATION 1 Cross-Layer Optimization of Radio Sleep Intervals to Increase Thin Client Energy Efficiency", doi: 10.1109/LCOMM.2010.11.101450.
- [126] Y. Wei, S. M. Bhandarkar, and S. Chandra, "A client-side statistical prediction scheme for energy aware multimedia data streaming," *IEEE Trans Multimedia*, vol. 8, no. 4, pp. 866–874, Aug. 2006, doi: 10.1109/TMM.2006.876232.
- [127] "USENIX 2002 Annual Technical Conference - Paper." Accessed: Jul. 13, 2024.
[Online]. Available:
https://www.usenix.org/legacy/event/usenix02/full_papers/chandra/chandra_html/
- [128] P. Simoens, F. De Turck, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Remote display solutions for mobile cloud computing," *Computer (Long Beach Calif)*, vol. 44, no. 8, pp. 46–53, Aug. 2011, doi: 10.1109/MC.2011.70.

- [129] S. Chandra, “Wireless Network Interface Energy Consumption Implications of Popular Streaming Formats,” 2001.
- [130] J. Ringler, “REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE Une modélisation bayésienne du taux de défaillance en fiabilité.” [Online]. Available: <http://www.numdam.org/conditions>
- [131] B. Lanternier, D. Charpentier, and P. Lyonnet, “Modélisation de taux de défaillance en mécanique,” p. 4, Oct. 2006, Accessed: Jul. 13, 2024. [Online]. Available: <https://ineris.hal.science/ineris-00973237>
- [132] P. Lyonnet *et al.*, “Modélisation de la fiabilité des macro-composants mécanique à partir de modèles mathématiques et de réseaux de neurones, comparaisons des méthodes,” pp. 372–385, Oct. 2006, Accessed: Jul. 13, 2024. [Online]. Available: <https://ineris.hal.science/ineris-00973247>
- [133] V. Barbu and N. Limnios, “Discrete Time Semi-Markov Processes for Reliability and Survival Analysis — A Nonparametric Estimation Approach,” pp. 487–502, 2004, doi: 10.1007/978-0-8176-8206-4_30.
- [134] N. Limnios and G. Oprişan, “Semi-Markov Processes and Reliability,” *Semi-Markov Processes and Reliability*, 2001, doi: 10.1007/978-1-4612-0161-8.
- [135] Shivashankar, G. Varaprasad, and S. H. Narayanagowda, “Implementing a new power aware routing algorithm based on existing dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks,” *IET Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 137–142, Jun. 2014, doi: 10.1049/iet-net.2013.0050.

- [136] A. Al-Baz and A. El-Sayed, “A new algorithm for cluster head selection in LEACH protocol for wireless sensor networks,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1002/dac.3407.
- [137] S. Tyagi and N. Kumar, “A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks,” Mar. 2013. doi: 10.1016/j.jnca.2012.12.001.
- [138] S. Amiri, H. Saidi, A. Ghiasian, and M. R. Hashemi, “Enhanced lifetime maximization algorithm for wireless sensor network,” *IWCMC 2011 - 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 302–307, 2011, doi: 10.1109/IWCMC.2011.5982550.
- [139] A. Rumshisky and A. Stubbs, “Machine Learning for Higher-Level Linguistic Tasks,” in *Handbook of Linguistic Annotation*, 2017. doi: 10.1007/978-94-024-0881-2_13.
- [140] W. R. Gilks, S. Richardson, and D. Spiegelhalter, *Markov Chain Monte Carlo in Practice*. in Chapman & Hall/CRC Interdisciplinary Statistics. CRC Press, 1995.
[Online]. Available: <https://books.google.com.eg/books?id=T2G1DwAAQBAJ>
- [141] K. P. Murphy, *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. The MIT Press, 2012.
- [142] C. Gonzales, L. Torti, and P. H. Wuillemin, “aGrUM: A Graphical Universal Model Framework,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 10351 LNCS, pp. 171–177, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-60045-1_20.
- [143] G. Ducamp, C. Gonzales, and P.-H. W. Fr, “aGrUM/pyAgrum : a toolbox to build models and algorithms for Probabilistic Graphical Models in Python,” Feb. 02, 2020,

PMLR. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available:
<https://proceedings.mlr.press/v138/ducamp20a.html>

[144] “aGrUM/pyAgrum – aGrUM/pyAgrum.” Accessed: Jul. 14, 2024. [Online].
Available: <https://agrum.gitlab.io/>

Index

Annexe A – Algorithme de reconfiguration

Ci-dessous une partie détaillée de l'algorithme mentionné dans le chapitre 4. À la réception d'un paquet des nœuds périphériques, le nœud central lit les entêtes pour savoir si cela provient du même cluster ou d'un nœud externe. Ensuite s'il s'agit d'une insertion le processus peut s'activer. Une suite de procédures est activée, s'il est nécessaire de faire un repositionnement des nœuds du cluster ou bien l'insérer directement, ou encore une reconfiguration ou une segmentation en plusieurs couches ou encore définir carrément une nouvelle géométrie.

Entrées : paquets,

Variables : repositionnement, coordonnées

Sorties : Reconfiguration

Tant que réception

Lire (paquet)

Si nœuds existant dans le cluster

Traitement normal

Sinon insertion

Lire (Coordonnées)

Avertissement des autres nœuds

Si coordonnées indisponibles

Repositionnement ← 0

Afficher (Repositionnement impossible)

Sinon repositionnement

Tant que repositionnement

Si reconfiguration = 0

Faire (Insertion)

Faire repositionnement

```

    Traitement message
    Avertissement mise à jour de la table
Sinon reconfiguration
    Lire (coordonnées)
    Calcul de position
    Faire repositionnement
    Faire (Insertion)
    Reconfiguration ← repositionnement
    Avertissement mise à jour de la table
Sinon segmentation
    Calcul des coordonnées
    Faire (repositionnement)
    Faire (Insertion)
    Reconfiguration ← repositionnement
    Avertissement mise à jour de la table
Sinon
    Faire (nouvelle géométrie)
    Faire (repositionnement)
    Faire (Insertion)
    Reconfiguration ← repositionnement
    Avertissement mise à jour de la table
Fin si
    Fin tant que
    Fin si
    Fin tant que
    Fin

```

```

import pyAgrum as gum

# Création du DBN
dbn = gum.DynamicBN()

# Ajout des variables à t=0
nb_0 = dbn.add(gum.LabelizedVariable("Nb_0", "Nombre de communications", ["faible",
"moyen", "eleve"]))

```

```

    cf_0 = dbn.add(gum.LabelizedVariable("Cf_0", "Cadence de communication", ["lente",
    "moyenne", "rapide"]))
    eb_0 = dbn.add(gum.LabelizedVariable("Eb_0", "État de la batterie", ["vert", "jaune",
    "rouge"]))
    d_0 = dbn.add(gum.LabelizedVariable("D_0", "Défaillance", ["oui", "non"]))

# Définition des arcs intra-tranche
dbn.addArc(nb_0, cf_0)
dbn.addArc(cf_0, eb_0)
dbn.addArc(eb_0, d_0)

# Définition des probabilités initiales
dbn.cpt(nb_0).fillWith([1/3, 1/3, 1/3]) # Distribution uniforme
dbn.cpt(cf_0)[{"Nb_0": "faible"}] = [0.99, 0.01, 0.00]
dbn.cpt(cf_0)[{"Nb_0": "moyen"}] = [0.65, 0.30, 0.05]
dbn.cpt(cf_0)[{"Nb_0": "eleve"}] = [0.10, 0.30, 0.60]
dbn.cpt(eb_0)[{"Cf_0": "lente"}] = [0.95, 0.04, 0.01]
dbn.cpt(eb_0)[{"Cf_0": "moyenne"}] = [0.60, 0.30, 0.10]
dbn.cpt(eb_0)[{"Cf_0": "rapide"}] = [0.20, 0.50, 0.30]
dbn.cpt(d_0)[{"Eb_0": "vert"}] = [0.02, 0.98]
dbn.cpt(d_0)[{"Eb_0": "jaune"}] = [0.30, 0.70]
dbn.cpt(d_0)[{"Eb_0": "rouge"}] = [0.90, 0.10]

# Ajout des arcs inter-tranches (simplifié pour t=1 à t=5)
for t in range(1, 6):
    nb_t = dbn.add(gum.LabelizedVariable(f"Nb_{t}", "", ["faible", "moyen", "eleve"]))
    cf_t = dbn.add(gum.LabelizedVariable(f"Cf_{t}", "", ["lente", "moyenne", "rapide"]))
    eb_t = dbn.add(gum.LabelizedVariable(f"Eb_{t}", "", ["vert", "jaune", "rouge"]))
    d_t = dbn.add(gum.LabelizedVariable(f"D_{t}", "", ["oui", "non"]))

    # Arcs intra-tranche
    dbn.addArc(nb_t, cf_t)
    dbn.addArc(cf_t, eb_t)
    dbn.addArc(eb_t, d_t)

    # Arcs inter-tranches
    dbn.addArc(dbn.idFromName(f"Nb_{t-1}"), nb_t)

```

```

dbn.addArc(dbn.idFromName(f"Cf_{t-1}"), cf_t)
dbn.addArc(dbn.idFromName(f"Eb_{t-1}"), eb_t)
dbn.addArc(dbn.idFromName(f"D_{t-1}"), d_t)
# Probabilités de transition (simplifiées)
dbn.cpt(nb_t).fillWith([0.4, 0.3, 0.3]) # Exemple
dbn.cpt(cf_t)[{f"Nb_{t}": "faible"}] = [0.99, 0.01, 0.00]
dbn.cpt(cf_t)[{f"Nb_{t}": "moyen"}] = [0.65, 0.30, 0.05]
dbn.cpt(cf_t)[{f"Nb_{t}": "eleve"}] = [0.10, 0.30, 0.60]
dbn.cpt(eb_t)[{f"Eb_{t-1}": "vert", f"Cf_{t}": "lente"}] = [0.90, 0.08, 0.02]
dbn.cpt(eb_t)[{f"Eb_{t-1}": "vert", f"Cf_{t}": "rapide"}] = [0.50, 0.40, 0.10]
dbn.cpt(eb_t)[{f"Eb_{t-1}": "jaune", f"Cf_{t}": "rapide"}] = [0.10, 0.60, 0.30]
dbn.cpt(eb_t)[{f"Eb_{t-1}": "rouge", f"Cf_{t}": "rapide"}] = [0.00, 0.00, 1.00] # État
absorbant
dbn.cpt(d_t).fillWith([0.5, 0.5]) # Simplifié

# Inférence avec méthode approchée déterministe
ie = gum.LazyPropagation(dbn)
ie.makeInference()

# Observation de Eb_t sur T=5 tranches
for t in range(6):
    print(f"Tranche {t}: P(Eb_{t} = rouge) = {ie.posterior(dbn.idFromName(f"Eb_{t}"))['rouge']}")
    print(f"Tranche {t}: P(D_{t} = oui) = {ie.posterior(dbn.idFromName(f"D_{t}"))['oui']}")

Évolution de des probabilités de défaillance
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Temps de 0 à 50
t = np.linspace(0, 50, 100)

# Probabilités approximatives de Eb_t (basées sur la Figure 37)
# On définit des points clés et on interpole linéairement

```

```

def interpolate_prob(t, times, probs):
    return np.interp(t, times, probs)

# Points clés pour chaque état (approximation)
times = [0, 8, 40, 42, 50]
p_eb0 = [0.2, 0.1, 0.7, 0.15, 0.15] # État 0 (vert)
p_eb1 = [0.2, 0.1, 0.05, 0.15, 0.15] # État 1 (vert)
p_eb2 = [0.2, 0.6, 0.05, 0.2, 0.2] # État 2 (jaune)
p_eb3 = [0.1, 0.1, 0.05, 0.2, 0.2] # État 3 (jaune)
p_eb4 = [0.15, 0.05, 0.05, 0.15, 0.15] # État 4 (rouge)
p_eb5 = [0.15, 0.05, 0.05, 0.15, 0.15] # État 5 (rouge)

# Interpolation des probabilités
p_eb0_t = interpolate_prob(t, times, p_eb0)
p_eb1_t = interpolate_prob(t, times, p_eb1)
p_eb2_t = interpolate_prob(t, times, p_eb2)
p_eb3_t = interpolate_prob(t, times, p_eb3)
p_eb4_t = interpolate_prob(t, times, p_eb4)
p_eb5_t = interpolate_prob(t, times, p_eb5)

# Calcul des probabilités cumulées pour vert, jaune, rouge
p_vert = p_eb0_t + p_eb1_t
p_jaune = p_eb2_t + p_eb3_t
p_rouge = p_eb4_t + p_eb5_t

# Probabilités conditionnelles de D_t
p_d_oui_given_vert = 0.02
p_d_oui_given_jaune = 0.30
p_d_oui_given_rouge = 0.90

# Calcul de P(D_t = oui)
p_d_oui = (p_d_oui_given_vert * p_vert) + (p_d_oui_given_jaune * p_jaune) +
(p_d_oui_given_rouge * p_rouge)

```

```

# Création de la figure
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(t, p_d_oui, 'r-', label='P(D_t = oui)')
plt.title('Évolution de la probabilité de défaillance (P(D_t = oui)) sur 50 unités de temps')
plt.xlabel('Temps')
plt.ylabel('Probabilité')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.savefig('failure_probability.png')

```

Annexe B – Les Plateformes

Tableau 9 Les différentes plateformes

Réseau	<i>OMNET++, NS2</i>
Traitement du signal	<i>MATLAB/Simulink</i>
Reconfiguration Dynamique	<i>Python, Numpy, Pandas, Scipy</i>
Probabilité	<i>PyAgrum, Numpy, Pandas, Seaborn</i>

