

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Saad Dahlab Blida

Institut d'Aéronautique et des études spatiales

Département de la navigation aérienne



Spécialité : Communication Navigation Surveillance/Air Traffic Management

Thème

**Simulation et Analyse des Performances de la Communication
5G dans les Applications de Drones et d'Avions Autonomes
sous Conditions Réelles**

Réalisé par :

- ✓ ZERROUK Mohamed
- ✓ GUERAINI Menaouer

Proposé et supervisé par :

- ✓ Mme. AZINE Houria

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde gratitude envers Dieu le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la persévérance et la santé tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères à **Madame AZINE Houria**, notre promotrice, pour son encadrement bienveillant, sa disponibilité constante et ses conseils avisés qui ont été d'une aide précieuse tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et son soutien nous ont permis d'avancer avec confiance.*

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, leurs remarques constructives et leurs suggestions pertinentes qui ont contribué à enrichir notre réflexion.

Enfin, nous n'oublions pas toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire : collègues, amis, proches et membres de notre entourage. Votre soutien moral, vos encouragements et vos mots de motivation ont été essentiels dans cette aventure, et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.

**في الأخير لا ننس الترحم على صديقنا المتوفى زوير محمد حيدر والبروفيسور بوكراع صالح
اللهم اغفر لهما وارحمهما واجعل قبورهما روضة من رياض الجنة**

Dédicace

*À mes chers parents, **HAMID** et **NOURIA***

Pour votre amour infini, vos sacrifices silencieux, et votre foi en moi, même dans les moments où moi-même je doutais. Ce mémoire est le fruit de tout ce que vous m'avez transmis.

*À mes frères **NASREDDINE**, **WASSIM** et mes sœurs **YOUSRA** et **AMINA**,*

Pour votre soutien, vos encouragements simples mais sincères, et votre présence constante dans ma vie.

*À mes amis **AMIR**, **NAIL**, **AYOUB**,*

Merci pour vos mots réconfortants, vos conseils, vos sourires, et votre patience pendant les moments d'épuisement.

À moi-même,

*Pour avoir tenu bon malgré les difficultés, les longues nuits, et les remises en question.
Ce travail est aussi une preuve de ma résilience.*

Et à toutes celles et ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à cette étape de mon parcours : je vous en suis profondément reconnaissant

Menaouer

Dédicace

En premier lieu, je remercie Allah tout-puissant qui m'a donné le courage et la patience et la volonté de mener à bien ce modeste travail. Je consacre cette petite œuvre

A la meilleure des mères Nabiha

La Source de tendresse et de la force, la source de don et d'amour, ma mère qui croyait à mes compétences et m'encourageait et priait pour moi. Ces lignes ne seront pas suffisantes pour vous remercier ou vous récompenser pour vos sacrifices et votre diligence en vue d'atteindre cette étape. Tu as fait plus que ce que peut faire une mère, puisse ALLAH te protège et allonge ta vie

Au meilleur des pères Khaled

Je ne saurai jamais exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Père, Merci pour votre travail, votre fatigue et votre sacrifice pour ma carrière d'étudiant

A ma souer

Tu es le cadeau le plus précieux que mes parents m'aient fait, les mots seuls ne peuvent exprimer mon amour pour toi. Qu'ALLAH vous garde et vous aide à accomplir à votre désir

A mes tantes

Amel et Amira

A mes chers amis

Omar ,abdelrazek,riad ,siad ahmed ,fodil, imad , lotfi ,adel ,abdelhak,

A mes chers collègues

Menaouer ,wiam , nihad , houda , amira

Mohamed

Résumé

Ce projet présente une simulation complète des communications 5G dans les applications de drones et d'avions autonomes, en conditions réalistes. Une interface MATLAB a été développée pour modéliser les performances radio à travers quatre environnements caractéristiques : urbain, suburbain pluvieux, rural enneigé et montagneux brumeux. Quatre modèles de propagation (Ikewa, Friis, ITU-R P.676 et P.530) sont intégrés pour évaluer trois métriques clés : puissance reçue, SNR et débit. Les résultats montrent que les modèles Friis et Ikewa permettent une meilleure estimation des pertes dans des environnements dégradés, complétant les modèles classiques. Cette approche offre un outil pertinent pour anticiper les limites des communications 5G en contexte autonome et optimiser les liaisons radio selon le terrain et la météo.

Abstract

This project presents a comprehensive simulation of 5G communications for drones and autonomous aircraft under realistic conditions. An interactive MATLAB-based interface was developed to model radio performance across four representative environments: urban, rainy suburban, snowy rural, and foggy mountainous. Four propagation models (Ikewa, Friis, ITU-R P.676, and ITU-R P.530) are implemented to evaluate three key metrics: received power, signal-to-noise ratio (SNR), and data rate. Results show that Friis and ikewa models provide more accurate estimations of losses in degraded environments, effectively complementing classical models. This approach offers a relevant tool to anticipate 5G communication limitations in autonomous contexts and optimize radio links according to terrain and weather conditions.

ملخص

يقدم هذا المشروع محاكاة شاملة لاتصالات الجيل الخامس (5G) للطائرات بدون طيار والطائرات ذاتية القيادة في ظروف واقعية. طوّرت واجهة تفاعلية قائمة على MATLAB لنمذجة أداء الاتصالات اللاسلكية في أربع بيئات تمثيلية: حضرية، وضواحي ممطرة، وريفية ثلجية، وجبلية ضبابية. طُبِّقت أربعة نماذج انتشار (Ikewa، Friis، وITU-R P.676، وITU-R P.530) لتقييم ثلاثة مقاييس رئيسية: القدرة المستقبلية، ونسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، ومعدل البيانات. تُظهر النتائج أن نماذج Friis و ikewa تُقدِّم تقديرات أكثر دقة للخسائر في البيئات المتدهورة، مُكمِّلة بذلك النماذج التقليدية بفعالية. يُقدِّم هذا النهج أداة فعّالة لتوقع قيود اتصالات الجيل الخامس في سياقات الطيران ذاتية القيادة، وتحسين الروابط اللاسلكية وفقاً للتضاريس وظروف الطقس.

Table des matières

Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste d'abréviations	X
INTRODUCTION GENERALE.....	12
CHAPITRE 1 : LA REGLEMENTATION DE LA 5G EN ALGERIE ET SON IMPACT SUR LE SYSTEME CNS /ATM	
1.1 Introduction	15
1.2 Évolution des Générations Mobiles et Place de la 5G dans l'Aéronautique.....	15
1.2.1 Évolution des générations mobile	16
1.2.2 Comparaison des Caractéristiques Techniques des Générations Mobiles.....	17
1.3 Principe de base réseaux 5G.....	19
1.3.1 Définition de technologie 5G.....	19
1.3.2 Caractéristique de 5G.....	19
1.3.3 Applications de la 5G dans les Domaines Stratégiques.....	19
1.3.4 Apports opérationnels de la 5G dans l'écosystème aéronautique.....	20
1.4 La réglementation de la 5G en Algérie	22
1.4.1 Contexte national	22
1.4.2 Les Fréquences 5G.....	25
1.4.3 Situation en Algérie	26
1.4.4 Défis réglementaires	27
1.5 Impact de la 5G sur le système CNS/ATM.....	29
1.5.1 Communication.....	29
1.5.2 Navigation.....	30
1.5.3 Surveillance.....	30
1.5.4 Gestion de trafic aérien (ATM).....	30
1.6 Risques et défis liés à la 5G dans le contexte aéronautique	31
1.6.1 Interférences avec les systèmes aéronautiques	32
1.6.2 Cybersécurité	32
1.6.3 Gestion du trafic aérien (ATM)	33
1.7 Enjeux et rythmes différenciés du déploiement 5G dans le monde	33
1.8 Conclusion.....	35

CHAPITRE 2 : MODELISATION ET ANALYSE DE LA PROPAGATION DES ONDES 5G POUR LES DRONES ET AVIONS AUTONOMES

2.1	Introduction	38
2.2	Classification des aéronefs autonomes étudiés	39
2.2.1	Historique.....	39
2.2.2	Drones	40
2.2.3	Avion autonome.....	40
2.2.4	Typologie des véhicules aériens sans pilote	41
2.2.5	Applications des drones	42
2.2.6	Applications des avions autonomes	43
2.2.7	Comparaison entre drone et avion autonomes	44
2.2.8	L'impact de 5G sur les drones et les avions autonomes	46
2.3	Principes de base de la propagation des ondes radio.....	46
2.3.1	Caractéristiques des ondes radio.....	46
2.3.2	Facteurs influençant la propagation.....	47
2.3.3	Mobilité et effet Doppler	48
2.4	Modèles de propagation pour la 5G	49
2.4.1	Classification des Modèles de Propagation	49
2.4.2	Modèles pertinents pour l'aéronautique.....	50
2.5	Formules et Calcul des pertes de signal	51
2.5.1	Pertes en espace libre (Free Space Path Loss - FSPL).....	51
2.5.2	Modele COST 231 Walfisch-ikegami	51
2.5.3	Modèle ITU P-676	52
2.5.4	Modèle ITU P-530	52
2.5.5	Pertes dues aux obstacles	52
2.5.6	Pertes dues à la mobilité	53
2.5.7	Impact des conditions environnementales sur la propagation des ondes 5G...53	
2.5.8	Calcul de la puissance reçue	56
2.5.9	Calcul du SNR (Signal-to-Noise Ratio).....	56
2.5.10	Débit Théorique et Influence du SNR.....	57
2.6	Application des modèles de propagation et des pertes aux drones et avions autonomes	58
2.6.1	Environnement urbain.....	58
2.6.2	Environnement rural	59

2.6.3 Environnement aéroportuaire.....	59
2.7 Conclusion.....	60
CHAPITRE 3 : SIMULATION ET ANALYSE DES PERFORMANCES DE LA 5G	
3.1 Introduction	62
3.2 Paramètres de Simulation.....	63
3.3 Environnements simulés.....	63
3.4 Modèles de Propagation	64
3.5 Métriques de Performance.....	65
3.6 Méthodologie de simulation.....	65
3.7 Description de programme	65
3.8 Analyse globale	67
3.8.1 Suburbain pluvieux	67
3.8.2 Rural neigeux	70
3.8.3 Urbain normal	73
3.8.4 Montagneux et brumeux	76
3.9 Interface.....	83
3.10 Conclusion.....	87
CONCLUSION GENERALE	89
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	91

Liste des figures

Figure 1. 1: Evolution des générations de technologie mobile.	17
Figure 1. 2: Amélioration de l’aviation grâce à la technologie 5G.	22
Figure 1. 3: Diversité spectrale et bandes de fréquences 5G.	26
Figure 1. 4: Impact de la 5G de l’efficacité et la sécurité dans l’aéronautique.	31
Figure 1. 5: Risques et défis liés à la 5G dans le contexte aéronautique.	32
Figure 1. 6: Comparaison de la couverture, de la vitesse et de l’adoption de la 5G selon les régions.	35
Figure 2. 1: L’évolution des véhicules aériens sans pilote (UAV)	39
Figure 2. 2: Drone Mavic Pro 1.	40
Figure 2. 3 : Avion autonome.	41
Figure 2. 4 : Représentations visuelles des principaux types de drones aériens.	42
Figure 2. 5 : Arbre des principales applications civiles et militaires des drones.	42
Figure 2. 6 : applications des avions autonomes.	43
Figure 2. 7 : Représentations d’un avion-cargo autonome (a) et d’un drone GPS compact(b).	46
Figure 2. 8 : Caractéristiques des ondes radio.	47
Figure 2. 9 : Facteurs affectant la propagation des ondes radio pour les drones.	49
Figure 3. 1: "Puissance reçue - suburbain pluvieux"	67
Figure 3. 2: Rapport SNR –suburbain pluvieux.	68
Figure 3. 3: Débit – suburbain pluvieux.	69
Figure 3. 4: Puissance reçue – rural neigeux.	70
Figure 3. 5: Rapport SNR – rural neigeux.	71
Figure 3. 6: Débit – rural neigeux.	72
Figure 3. 7: Puissance reçue – urbain normal.	73
Figure 3. 8: Rapport SNR – urbain normal.	74
Figure 3. 9: Débit – urbain normal.	75
Figure 3. 10: Puissance reçue – montagneux brumeux.	77
Figure 3. 11: Rapport SNR – montagneux brumeux.	78
Figure 3. 12: Débit - montagneux brumeux.	79
Figure 3. 13: Moyenne des puissances reçues tous cas confondus.	80

Figure 3. 14: Débit moyen tous environnements et altitudes confondus.	81
Figure 3. 15: Interface de simulation.	84
Figure 3. 16 : exemple de simulation.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Évolution des Générations de Réseaux Mobiles	16
Tableau 1. 2: Comparaison des Générations de Réseaux Mobiles	18
Tableau 1. 3: Applications pertinentes de la 5G pour l'aéronautique.....	20
Tableau 1. 4: Mesures d'atténuation internationales	24
Tableau 1. 5: Classification et Caractéristiques des fréquences de 5G.....	25
Tableau 1. 6: Le déploiement et les performances de la 5G dans différentes régions du monde	33
Tableau 2. 1: Principaux types de drones et caractéristiques comparées.....	41
Tableau 2. 2: Caractéristiques générales et technologiques.....	44
Tableau 2. 3: Applications et défis associés	45
Tableau 2. 4: Comparaison entre Modèles Déterministes et Empiriques	49
Tableau 2. 5: Modèles de Propagation Pertinents pour l'Aéronautique	50
Tableau 3. 1: Les équations de modèles de propagations	64
Tableau 3. 2 : analyse de la figure 3.1.....	67
Tableau 3. 3 : analyse de la figure 3.2	68
Tableau 3. 4 : analyse de la figure 3.3.....	69
Tableau 3. 5 : analyse de la figure 3.4.....	70
Tableau 3. 6 : analyse de la figure 3.5.....	71
Tableau 3. 7 : analyse de la figure 3.6.....	72
Tableau 3. 8 : analyse de la figure 3.7.....	73
Tableau 3. 9 : analyse de la figure 3.8.....	74
Tableau 3. 10 : analyse de la figure 3.9.....	75

Tableau 3. 11 : analyse de la figure 3.10.....	77
Tableau 3. 12 : analyse de la figure 3.11.....	78
Tableau 3. 13 : analyse de la figure 3.12.....	79
Tableau 3. 14 : analyse de la figure 3.13.....	80
Tableau 3. 15 : analyse de la figure 3.14.....	81
Tableau 3. 16: Synthèse comparative des performances des modèles de propagation selon l'environnement et les paramètres de communication (puissance reçue, débit, SNR.....	82
Tableau 3. 17 : comparaison entre le drone et l'Avion autonomes dans les quatre environnements.....	82

Liste des abréviations

ANAC	Agence Nationale de l'Aviation Civile
ANF	Agence Nationale des Fréquences
ARPCÉ	Autorité de Régulation de la Poste et des Communications Électroniques
ATM	Air Traffic Management
BPL	Building Penetration Loss
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CNS	Communication, Navigation and Surveillance
EASA	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
FAA	Federal Aviation Administration
FG	Example for maintenance prédictive à dessousie (signification à préciser)
FSPL	Free Space Path Loss
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High-Speed Packet Access
IA	Intelligence Artificielle
IP	Internet Protocol
ISI	InterSymbol Interference
ITU	Propagation data and prediction methods for the terrestrial line-of-sight
P.530	systems
ITU	Attenuation by atmospheric gases
P.676	
IoT	Internet of Things
LTE	Long-Term Evolution
NLOS	Non-Line-of-Sight

NR	New Radio
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
SMS	Short Message Service
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SUA	Small Unmanned Aircraft
TDMA	Time Division Multiple Access
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

INTRODUCTION GENERALE

L'essor des communications sans fil de cinquième génération (5G) marque un changement de paradigme technologique majeure, ouvrant de nouvelles perspectives pour le secteur aéronautique, notamment en matière de contrôle et de connectivité des drones et des avions autonomes. Grâce à sa faible latence, sa large bande passante et sa capacité de connexion massive, la 5G s'impose progressivement comme un pilier central des systèmes CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management).

Cependant, malgré ces avantages prometteurs, l'intégration de la 5G dans des environnements critiques tels que l'espace aérien soulève plusieurs défis : interférences électromagnétiques, pertes de signal liées aux conditions météorologiques, ou encore complexité des modèles de propagation dans des milieux réels.

La problématique centrale de ce mémoire réside dans la difficulté à anticiper de manière fiable les performances des communications 5G dans des conditions environnementales variées (pluie, neige, brouillard, obstacles physiques, altitudes changeantes, etc.). En effet, les drones et aéronefs autonomes évoluent dans des environnements dynamiques, où la qualité du lien radio dépend d'un ensemble de paramètres physiques, topographiques et météorologiques, rendant les prévisions purement théoriques souvent insuffisantes.

Un point essentiel, souvent négligé, concerne les différences structurelles et opérationnelles entre un drone et un avion autonome. Contrairement à une idée reçue, ces deux types de plateformes ne sont ni équivalents ni interchangeables. Les drones opèrent généralement à basse altitude, à vitesse réduite, dans des zones urbaines ou suburbaines riches en obstacles, ce qui les expose fortement aux phénomènes de diffraction, d'atténuation par les bâtiments et d'interférences multi-trajets. Les avions autonomes, quant à eux, volent à haute altitude, à grande vitesse, et sur des distances plus longues, où d'autres facteurs deviennent prédominants : absorption atmosphérique, conditions météorologiques en altitude, fading induit par les couches denses de l'atmosphère ou par les reliefs. Ainsi, les effets des paramètres environnementaux et des modèles de propagation ne s'appliquent pas de façon uniforme aux deux types de vecteurs. C'est précisément ce constat qui justifie une modélisation différenciée et comparative, telle que celle proposée dans ce mémoire.

Pour répondre à cette problématique, deux approches complémentaires ont été développées dans ce travail :

- **Une simulation statique**, réalisée à l'aide d'un script MATLAB, permettant l'application de plusieurs modèles de propagation (Friis, Ikegami, ITU-R P.676, ITU-R P.530) à des scénarios prédéfinis. Cette approche permet une analyse comparative, reproductible et précise des pertes de signal et du SNR dans différents types d'environnements (urbain, rural, montagneux, etc.).
- **Une simulation dynamique**, présentée sous forme d'interface graphique interactive baptisée « *Simulation 5G Drones et Avions* », permet à l'utilisateur de configurer en temps réel les paramètres du scénario (environnement, type de plateforme, vitesse, hauteur TX/RX, modèle de propagation) et de visualiser instantanément les résultats (courbes de perte de propagation, SNR, débit, etc.). Cette solution vise à rendre l'analyse plus accessible, visuelle et adaptable à des cas pratiques concrets.

Ainsi, ce mémoire a pour double objectif d'analyser les performances de la 5G dans des contextes réalistes, tout en proposant un outil de simulation évolutif pouvant servir d'aide à la décision pour l'optimisation des communications aéronautiques, en tenant compte des spécificités propres à chaque type de vecteur autonome.

L'étude est structurée en trois chapitres :

Chapitre 1 : Présente le cadre réglementaire de la 5G en Algérie, ses enjeux pour la sécurité aérienne, et son intégration dans les systèmes CNS/ATM.

Chapitre 2 : Décrit les principes de la propagation radio, les modèles sélectionnés et les méthodes de calcul des pertes en environnements variés.

Chapitre 3 : Détaille les résultats des simulations statiques et dynamiques, compare les performances des différents modèles, et propose des recommandations pratiques.

Enfin, ce mémoire se conclura par une conclusion générale synthétisant les apports de l'étude, ainsi que des perspectives d'amélioration et de prolongement de ce travail.

Ce mémoire s'inscrit ainsi dans une démarche à la fois analytique et applicative, visant à favoriser une intégration fiable et optimisée de la 5G dans les systèmes de communication aéronautique autonomes.

CHAPITRE 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS/ATM

1.1 Introduction

La cinquième génération de réseaux mobiles (5G) constitue un changement de paradigme technologique majeure dans le domaine des communications sans fil. Grâce à ses caractéristiques avancées, notamment un débit de données très élevé, une latence extrêmement faible et une capacité de connexion massive, la 5G ouvre de nouvelles perspectives pour des applications critiques, telles que les véhicules aériens autonomes, les drones et la modernisation de l'infrastructure aéronautique.

Cependant, son déploiement dans le secteur aérien, notamment à proximité des aéroports et dans les zones sensibles du trafic aérien, suscite des interrogations légitimes quant aux risques d'interférences électromagnétiques avec les systèmes CNS/ATM (Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management). En effet, certaines bandes de fréquence utilisées par la 5G se situent à proximité de celles employées par les radioaltimètres, instruments critiques pour la sécurité des phases d'approche et d'atterrissage des aéronefs.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser la réglementation actuelle encadrant le déploiement de la 5G en Algérie, tout en s'appuyant sur les standards internationaux, afin d'identifier les contraintes, les précautions mises en œuvre, ainsi que les opportunités qu'offre cette technologie pour le secteur aérien. Cette analyse réglementaire posera les bases nécessaires à l'étude technique approfondie menée dans le chapitre suivant, qui portera sur les performances radioélectriques de la 5G en conditions environnementales réelles.

1.2 Évolution des Générations Mobiles et Place de la 5G dans l'Aéronautique

Les réseaux mobiles ont évolué de la 1G à la 5G, chaque génération apportant des améliorations majeures : la 1G pour la voix analogique, la 2G pour la numérisation et les SMS, la 3G pour l'Internet mobile, et la 4G pour le haut débit, les services IP et la faible latence.

La 5G marque une rupture. Elle offre des débits supérieurs à 10 Gbps, une latence inférieure à 1 milliseconde, et permet de connecter des millions d'objets simultanément. Ces caractéristiques sont particulièrement adaptées aux besoins du secteur aéronautique :

Chapitre 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS /ATM

commande de drones en temps réel, navigation autonome, surveillance à distance, et gestion avancée du trafic aérien.

Grâce à sa fiabilité et à sa réactivité, la 5G s'impose comme une technologie clé pour intégrer les aéronefs autonomes et optimiser les systèmes CNS/ATM, tout en assurant sécurité et performance dans des environnements critiques.

1.2.1 Évolution des générations mobile

Le Tableau 1.1 ci-dessous présente une synthèse des principales caractéristiques techniques des différentes générations de réseaux mobiles, en soulignant les avancées majeures introduites par la 5G, notamment dans des domaines sensibles tels que l'aéronautique et les véhicules autonomes [1, 2 ,3].

Tableau 1. 1: Évolution des Générations de Réseaux Mobiles [1, 2 ,3]

Génération	Période	Technologie	Débit maximal	Latence	Applications clés
1G	1980s	Analogique (AMPS, TACS)	~2 kbps	>300 ms	Appels vocaux analogiques
2G	1990s	GSM, CDMA, TDMA	~100 kbps	200–300 ms	Appels numériques, SMS
3G	2000s	UMTS, CDMA2000, HSPA	Jusqu'à 2 Mbps	100–200 ms	Internet mobile, visiophonie, services multimédias
4G	2010s	LTE, WiMAX	100 Mbps à 1 Gbps	30–50 ms	Streaming HD, jeux en ligne, VoIP, services cloud
5G	2020s	NR (New Radio), mmWave	Jusqu'à 10 Gbps et plus	<1 ms	Drones, véhicules autonomes, IoT massif, chirurgie à distance

Cette évolution technologique a permis une transition vers des usages de plus en plus complexes et critiques. La 5G se distingue particulièrement par sa capacité à répondre aux

Chapitre 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS /ATM

exigences des communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC), ouvrant la voie à des applications aéronautiques telles que la commande à distance de drones ou l'intégration sécurisée dans les systèmes CNS/ATM.

La figure 1.1 montre L'évolution des technologies mobiles, de la 1G à la 5G, illustre les progrès réalisés en matière de débit, de services et d'usages numériques.

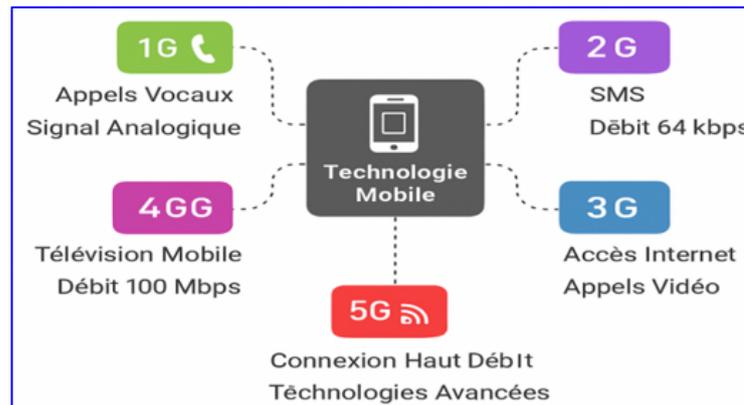


Figure 1. 1: Evolution des générations de technologie mobile[1, 2 ,3].

1.2.2 Comparaison des Caractéristiques Techniques des Générations Mobiles

L'évolution des technologies mobiles repose sur une série d'améliorations techniques successives, tant sur le plan de la vitesse de transmission que de la structure du réseau, des fonctionnalités et des techniques de multiplexage. Le tableau ci-dessous synthétise les principales différences entre les générations de réseaux mobiles, de la 1G à la 5G, en mettant en évidence les ruptures technologiques majeures.

En particulier, la 5G introduit des caractéristiques uniques telles que le tout-IP, la virtualisation du réseau, la densification des cellules et la possibilité d'intégrer l'intelligence artificielle (IA) pour gérer les services à très faible latence. Ces éléments en font une technologie particulièrement adaptée aux applications critiques comme la commande de drones, la navigation autonome ou les communications avion-sol ultra-fiables.

Tableau 1. 2: Comparaison des Générations de Réseaux Mobiles [1]

Caractéristiques	1G	2G	3G	4G	5G
Déploiement	1970–1980	1990–2004	2004–2010	~2010–présent	À partir de 2020
Débit maximal	~2 kbps	~64–100 kbps	~2 Mbps	Jusqu'à 1 Gbps	>10 Gbps
Technologie d'accès	Analogique	GSM, TDMA, CDMA	UMTS, HSPA, CDMA2000	LTE, WiMAX, OFDMA	NR (New Radio), mmWave, Beamforming
Fonctionnalités	Voix uniquement	Voix + SMS	Voix, vidéo, données	Vidéo HD, VoIP, Internet mobile	IoT massif, contrôle temps réel, IA
Multiplexage	FDMA	TDMA / CDMA	CDMA	OFDMA	OFDMA / NOMA
Commutation	Circuit	Circuit & Paquet	Principalement paquet	Tout IP	Tout IP avec virtualisation
Cœur de réseau	PSTN	PSTN	Réseau de paquets	IP / Internet	Core cloudifié (SDN, NFV)

Ce tableau montre clairement que la 5G n'est pas une simple amélioration incrémentale, mais bien une nouvelle architecture réseau conçue pour supporter des cas d'usage critiques, en particulier dans les domaines de la mobilité autonome et de la gestion aérienne avancée. Ces capacités justifient son étude dans le cadre d'applications telles que les drones et les aéronefs autonomes, qui nécessitent une communication fiable, rapide et à faible latence dans des environnements variables [1].

1.3 Principe de base réseaux 5G

1.3.1 Définition de technologie 5G

La technologie de réseau mobile 5G, cinquième génération, propose des débits de données nettement plus élevés, une latence réduite et une fiabilité accrue comparativement aux générations antérieures telles que la 4G et la 3G. Cela autorise le transfert fluide de grandes quantités d'informations en temps réel, essentiel pour les applications qui exigent une communication à haut débit et à faible latence. La mise en œuvre de la 5G dans le secteur aéronautique. Les réseaux dans le secteur aérien offrent un éventail de possibilités, allant de l'amélioration de la communication entre les avions et le sol à l'optimisation des expériences vécues par les passagers C.

1.3.2 Caractéristique de 5G

La 5G repose sur trois axes d'amélioration technologique majeurs, qui la distinguent nettement des générations précédentes :

- **Débit très élevé** : atteignant jusqu'à 10 Gbps, il permet la transmission instantanée de contenus à très haut volume, tels que les vidéos en 4K, les données radar ou les flux de télémétrie en temps réel.
- **Latence ultra-faible** : de l'ordre de 1 milliseconde, cette réactivité est cruciale pour les applications critiques, notamment la commande à distance de drones, les manœuvres aériennes autonomes ou les systèmes de navigation embarqués.
- **Connectivité massive** : la 5G peut prendre en charge jusqu'à un million de dispositifs connectés par kilomètre carré, facilitant l'intégration étendue de capteurs IoT dans les systèmes aéronautiques, aussi bien civils que militaires [5].

1.3.3 Applications de la 5G dans les Domaines Stratégiques

La 5G ouvre la voie à de nombreuses applications dans des secteurs critiques, notamment dans le domaine aéronautique. Dans le contexte de l'aviation et des drones autonomes, elle permet de répondre à des besoins variés allant de la connectivité embarquée à la gestion intelligente des opérations aéroportuaires. Le tableau ci-dessous présente une synthèse des principales applications de la 5G dans ce domaine, en illustrant des cas d'usage concrets liés à l'aviation, aux drones, aux aéroports intelligents et aux systèmes de communication embarqués.

Tableau 1. 3: Applications pertinentes de la 5G pour l'aéronautique[4]

Domaine	Application de la 5G	Exemple concret
Aviation	Transmission en temps réel des données avioniques	Surveillance moteur et maintenance prédictive à distance FG
Drones / UAV	Commande à distance, évitement d'obstacles, navigation autonome	Livraison de colis par drones avec contrôle 5G
	Gestion des flux, automatisation des bagages, surveillances via caméras connectées	Système de gestion des files et passerelles automatisées
Aéroports intelligents	Optimisation des entrepôts et suivi des marchandises via capteurs IoT	Traçabilité en temps réel des bagages ou pièces détachées avioniques
	Télédiagnostic ou assistance médicale d'urgence à distance	Transfert en direct de données biomédicales en cas de malaise passager

1.3.4 Apports opérationnels de la 5G dans l'écosystème aéronautique

Dans le secteur aéronautique, la 5G est perçue comme un levier de transformation numérique, tant au niveau des aéronefs que des infrastructures aéroportuaires.

La figure ci-dessous illustre le rôle central de la 5G dans la transformation numérique du secteur aéronautique, en favorisant l'innovation, l'automatisation et l'intégration de services connectés avancés.

➤ Communication Air-Sol Améliorée

La latence réduite et la fiabilité accrue des liaisons 5G permettent une transmission en temps réel des données avioniques et des images de vidéosurveillance vers le sol, optimisant la maintenance prédictive et la gestion des opérations.

➤ Gestion du Trafic Aérien (ATM)

La 5G offre un potentiel significatif pour renforcer la gestion du trafic aérien :

- ✧ Partage instantané des données de position et de vol avec les contrôleurs aériens.

- ✧ Optimisation des trajectoires de vol grâce aux informations météo transmises en temps réel.
- ✧ Diminution de la consommation de carburant par une planification plus précise.

➤ **Expérience Passager Améliorée**

L'intégration de la 5G dans les cabines permet :

- ✧ Un Wi-Fi haut débit à bord des avions.
- ✧ Des services de divertissement en streaming sans latence.
- ✧ La possibilité d'offrir des **services connectés personnalisés** aux passagers.

➤ **Aéroports Intelligents et Automatisation**

Les aéroports intelligents s'appuient sur la 5G pour :

- ✧ La gestion automatisée **des** bagages, réduisant la perte et améliorant la traçabilité.
- ✧ Le contrôle en temps réel des flux de passagers, facilitant la gestion des files d'attente et le respect des mesures de sécurité.
- ✧ La gestion intelligente des ressources aéroportuaires, comme les parkings avions et les passerelles d'embarquement.

➤ **Maintenance Prédictive et Réduction des Temps d'Immobilisation**

Grâce à l'IoT et à la connectivité 5G, les aéronefs peuvent transmettre en continu des données de fonctionnement :

- ✧ Surveillance en temps réel des moteurs, systèmes hydrauliques et équipements critiques.
- ✧ Anticipation des pannes, réduisant les temps d'immobilisation et améliorant la disponibilité des avions.

➤ **Nouvelles Opportunités Commerciales**

L'intégration de la 5G ouvre la voie à :

- ✧ La monétisation des services connectés à bord.
- ✧ Le déploiement de services logistiques automatisés par drones pour le transport de fret et la livraison rapide.
- ✧ La participation des compagnies aériennes à des écosystèmes de villes intelligentes, notamment pour la mobilité urbaine aérienne (UAM) [6].

Chapitre 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS /ATM

La figure ci-dessous met en évidence les améliorations concrètes apportées par la 5G dans le secteur aérien, notamment en matière de communication, de gestion du trafic, de maintenance prédictive et d'expérience passagère

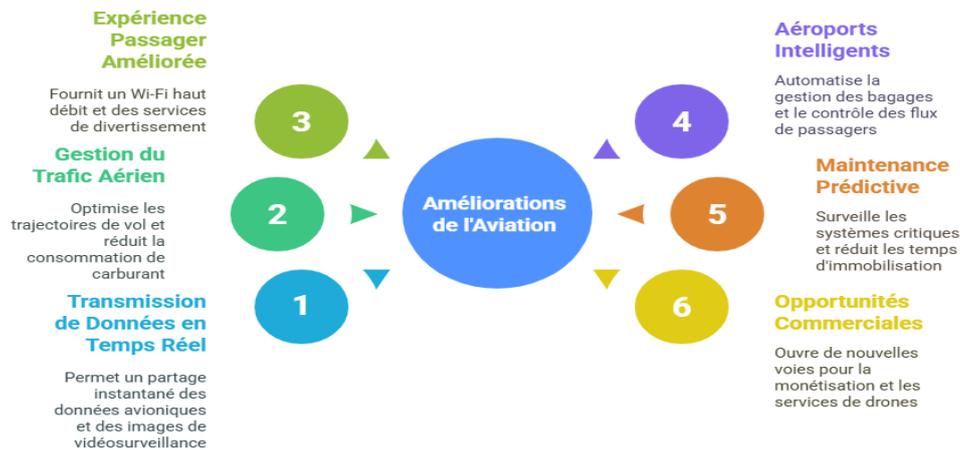


Figure 1. 2: Amélioration de l'aviation grâce à la technologie 5G.

1.4 La réglementation de la 5G en Algérie

Grâce à son très haut débit, sa faible latence et sa connectivité massive, la 5G offre un fort potentiel pour l'aéronautique. Cependant, son déploiement impose des exigences réglementaires strictes pour garantir la compatibilité avec les systèmes CNS/ATM et prévenir tout risque d'interférence radio.

1.4.1 Contexte national

Après avoir présenté les atouts techniques et les risques associés à la 5G dans l'environnement aérien, il convient désormais d'examiner les mécanismes réglementaires mis en place en Algérie pour encadrer son déploiement.

1.4.1.1 État actuel du déploiement de la 5G en Algérie

En 2023, l'Algérie est en phase pilote de déploiement de la technologie 5G. Des expérimentations sont en cours dans plusieurs grandes villes, notamment au sein des zones aéroportuaires des aéroports Houari Boumediene (Alger) et Ahmed Ben Bella (Oran) [6]. Ces tests techniques visent à évaluer :

- ✧ Les interférences potentielles avec les systèmes avioniques, en particulier les altimètres radio fonctionnant sur des fréquences proches de celles utilisées par certaines bandes 5G [9,10].
- ✧ La compatibilité de la 5G avec les instruments de bord et les radars aéroportuaires [8].
- ✧ La fiabilité et la continuité des communications sol-air dans un environnement numérique enrichi par la 5G.

Conformément aux recommandations des organismes internationaux tels que l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), la Federal Aviation Administration (FAA) et l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA), l'Algérie adopte une approche prudente, centrée sur la sécurité aérienne. À ce stade, aucune exploitation commerciale de la 5G n'est autorisée dans les zones aéroportuaires, en raison des risques potentiels identifiés sur les systèmes de navigation critiques.

1.4.1.2 Rôle de l'ARPCE et de l'ANAC dans l'Aéronautique

Dans le cadre du déploiement de la technologie 5G, les autorités algériennes s'assurent de préserver la sécurité aéronautique, notamment face aux risques d'interférences électromagnétiques. L'ARPCE et l'ANAC jouent un rôle central dans la régulation et la coordination des fréquences.

➤ Missions principales de l'ARPCE

L'Autorité de Régulation de la Poste et des Communications Électroniques (ARPCE) est responsable de :

- ✧ La gestion et l'attribution des bandes de fréquences pour les services de communications électroniques.
- ✧ La garantie de la neutralité technologique et de la concurrence équitable entre les opérateurs.
- ✧ L'application des normes internationales (UIT, CEPT) dans le déploiement de nouvelles technologies [11].
- ✧ La surveillance de l'utilisation du spectre et la limitation des interférences nuisibles.

➤ Collaboration avec l'ANF et l'ANAC

Chapitre 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS /ATM

- ✧ **Agence Nationale des Fréquences (ANF)** : planification et contrôle des fréquences dédiées à l'aviation civile [12].
- ✧ **Agence Nationale de l'Aviation Civile (ANAC)** : validation technique pour éviter les interférences entre la 5G et les systèmes CNS/ATM (Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management) [13].

➤ **Enjeux liés à la bande 3,4 – 3,8 GHz**

Les fréquences de la 5G en bande C (3,4 - 3,8 GHz) se trouvent à proximité de celles utilisées par les altimètres radio (4,2 - 4,4 GHz), instruments critiques pour la mesure de l'altitude, notamment lors des phases d'approche et d'atterrissage automatique en faible visibilité [14,15].

Ces interférences potentielles peuvent affecter :

- ✧ La précision de l'altimètre radar.
- ✧ La fiabilité des systèmes d'aide à l'atterrissage automatique (autoland).
- ✧ La sécurité des manœuvres lors des conditions météorologiques dégradées.

➤ **Mesures d'atténuation internationales**

Plusieurs pays ont mis en œuvre des mesures préventives pour limiter ces risques comme c'est illustré dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. 4: Mesures d'atténuation internationales [14,15]

Pays	Mesures mises en place
États-Unis (FAA)	Zones d'exclusion 5G autour des aéroports majeurs. Restrictions de puissance pour les antennes 5G proches des pistes d'atterrissage.
Union Européenne (EASA)	Puissance d'émission limitée à 23 dBm pour les stations 5G à proximité des aéroports. Surveillance des interférences dans la bande 4,2 – 4,4 GHz.
Canada	Zones tampons de plusieurs kilomètres autour des aéroports. Restrictions sur l'orientation des antennes 5G (interdiction de pointer vers les trajectoires d'approche).

En Algérie, des discussions sont en cours pour adopter des mesures similaires avant tout déploiement commercial de la 5G dans les zones aéroportuaires.

✧ **Bande C 5G (3,4 - 3,8 GHz)** : utilisée pour la connectivité haute débit mobile.

Altimètres radio (4,2 - 4,4 GHz) : essentiels pour la navigation aérienne, particulièrement pendant les phases d’approche et d’atterrissage automatique.

✧ Le problème majeur est le risque d’interférences dû à la proximité des bandes de fréquences. Des filtres, des limites de puissance et des zones tampons sont des solutions envisagées.

L’ARPCE, en coordination avec l’ANF et l’ANAC, a pour mission d’anticiper et de gérer ces enjeux pour garantir la sécurité de la navigation aérienne tout en favorisant le déploiement maîtrisé de la 5G en Algérie [14,15].

1.4.2 Les Fréquences 5G

Ce tableau présente les différentes bandes de fréquences utilisées pour les réseaux sans fil, en mettant en avant leurs avantages, inconvénients et usages typiques. Il montre que chaque bande (basse, moyenne, haute) offre un compromis unique entre portée, débit et pénétration, adapté à des besoins spécifiques comme la couverture rurale, urbaine ou les applications critiques :

Tableau 1. 5: Classification et Caractéristiques des fréquences de 5G [2]

Bande	Fréquences	Avantages	Inconvénients	Utilisation
Basses	< 1 GHz	Grande portée, bonne pénétration (10-50 km)	Débits limités	Zones rurales, couverture intérieure
Moyennes	1 à 6 GHz	Bon compromis portée/débit (1-10 km)	Pénétration moyenne	Zones urbaines, compromis portée/débit
Hautes ondes (mmWave)	> 24 GHz (jusqu'à 100 GHz)	Débits très élevés, faible latence)	Portée limitée, sensible aux obstacles (100-500 m)	Hotspots urbains, VR/AR, critiques d'applications

En Algérie, la bande de 3,5 GHz est priorisée, mais proche des bandes critiques 4,2 - 4,4 GHz utilisées par les radioaltimètres, nécessitant une attention réglementaire particulière [4].

La figure 1.4 montre les différentes bandes de fréquences de 5G :

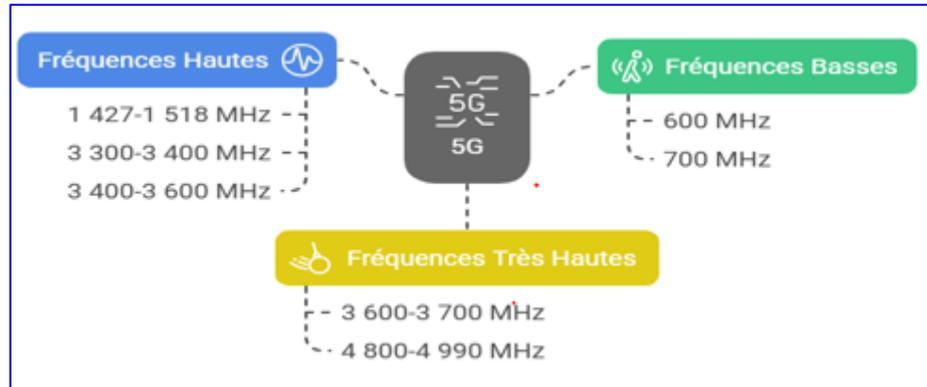


Figure 1. 3: Diversité spectrale et bandes de fréquences 5G [4].

1.4.3 Situation en Algérie

L'Algérie se trouve actuellement à une phase avancée de planification et de tests pour l'introduction de la technologie 5G sur son territoire. Si le pays envisage le déploiement commercial à moyen terme, de nombreuses considérations techniques, réglementaires et sécuritaires encadrent ce processus, notamment dans le secteur aéronautique où les exigences sont particulièrement strictes

1.4.3.1 Fréquences utilisées en Algérie

L'Autorité de Régulation de la Poste et des Communications Électroniques (ARPCE, ex-ARPT) prévoit d'attribuer plusieurs bandes de fréquences pour le déploiement de la 5G, en particulier la bande 3,5 GHz. Cependant, cette bande se situe à proximité immédiate de la bande 4,2 - 4,4 GHz utilisée par les radioaltimètres embarqués sur les avions. Ce chevauchement spectral soulève des préoccupations majeures en matière de risques d'interférences, pouvant affecter la précision des systèmes de navigation et de surveillance aéronautique [16].

1.4.3.2 Coordination entre l'ARPT et l'aviation civile

L'ARPCE collabore activement avec l'Autorité de l'Aviation Civile Algérienne (ANAC) pour s'assurer que l'introduction de la 5G ne compromette pas la sécurité aérienne. Cette coordination comprend :

- ✧ L'analyse des risques d'interférences entre les bandes 5G et les systèmes aéronautiques (CNS/ATM).
- ✧ La définition de zones tampons autour des aéroports, avec des restrictions de puissance sur les signaux 5G.
- ✧ L'adoption de normes techniques d'atténuation, incluant l'installation de filtres ou le choix de bandes de fréquences alternatives [17].

1.4.3.3 Mesures préventives envisagées

Pour éviter tout impact sur la sécurité des vols, l'Algérie pourrait s'aligner sur les bonnes pratiques internationales, à travers :

- ✧ La limitation de la puissance d'émission des antennes 5G dans les zones aéroportuaires.
- ✧ La mise en place d'une surveillance continue des fréquences pour détecter et résoudre les interférences.
- ✧ La formation des opérateurs télécoms et des autorités aéronautiques sur la gestion des risques liés à la cohabitation 5G et systèmes aéronautiques [18].

1.4.3.4 Impact sur les aéroports algériens

Les principaux aéroports du pays, tels que ceux de Houari Boumediene (Alger), Ahmed Ben Bella (Oran) et Mohamed Boudiaf (Constantine), sont directement concernés par ces mesures de précaution. Une coordination étroite entre les opérateurs de télécommunications et les autorités aéroportuaires sera essentielle afin de garantir la continuité de la sécurité aérienne [17].

1.4.4 Défis réglementaires

Le déploiement de la 5G en Algérie soulève plusieurs défis réglementaires, notamment en ce qui concerne la sécurité, la santé publique, et la compatibilité avec les systèmes de communication, navigation et surveillance pour la gestion du trafic aérien (CNS/ATM).

Ces défis nécessitent une approche coordonnée entre les différents acteurs, notamment le ministère des Télécommunications et le ministère des Transports.

1.4.4.1 Sécurité aéronautique et cybersécurité

La 5G introduit de nouveaux risques en matière de sécurité, notamment :

- ✧ Les risques d'interférences radio avec les altimètres radio et les systèmes CNS/ATM.
- ✧ La vulnérabilité accrue aux cyberattaques, en raison de l'architecture décentralisée de la 5G.

L'ARPCE et les opérateurs doivent :

- ✧ Mettre en œuvre des protocoles de cybersécurité robustes.

Veiller à ce que les équipements 5G, en particulier ceux importés, soient exempts de portes dérobées ou de vulnérabilités exploitables [18].

1.4.4.2 Santé Publique et Exposition aux Champs Électromagnétiques (CEM)

Les inquiétudes relatives à l'exposition aux ondes électromagnétiques demeurent un enjeu majeur :

- ✧ L'ARPCE et l'ANF assurent un suivi régulier des niveaux d'exposition.
- ✧ Les installations doivent respecter les seuils fixés par l'ICNIRP (2 W/kg pour le grand public).
- ✧ Des études d'impact sanitaire sont obligatoires avant toute autorisation d'installation de nouvelles antennes 5G [20].
- ✧ La communication publique est essentielle pour rassurer les citoyens et lutter contre la désinformation.

1.4.4.3 Normes d'exposition aux ondes électromagnétiques

L'Algérie veille à l'application des normes internationales édictées par :

- ✧ L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).
- ✧ La Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP).

L'ARPCE organise des campagnes de sensibilisation afin de vulgariser les mesures de protection et les niveaux d'exposition [19].

1.4.4.4 Compatibilité avec les systèmes CNS/ATM

Les systèmes Communication, Navigation et Surveillance / Air Traffic Management (CNS/ATM) sont vitaux pour la sécurité des opérations aériennes. La 5G doit impérativement garantir :

- ✧ Aucune interférence avec les équipements critiques, en particulier les radioaltimètres opérant dans la bande 4,2 - 4,4 GHz.
- ✧ La conduite d'études techniques approfondies pour évaluer les risques.

La mise en œuvre de solutions comme l'utilisation de bandes alternatives, l'ajout de filtres et la définition de zones d'exclusion 5G autour des aéroports [21].

1.4.4.5 Coordination avec l'aviation civile

Une coordination constante est requise entre l'ARPCE et l'ANAC pour :

- ✧ Définir des zones tampons.
- ✧ Limiter la puissance des signaux 5G à proximité des zones critiques d'approche et d'atterrissage [22].

1.5 Impact de la 5G sur le système CNS/ATM

Le déploiement de la technologie 5G représente une avancée majeure pour le secteur aéronautique, en particulier en ce qui concerne les systèmes de Communication, Navigation et Surveillance (CNS) ainsi que la gestion du trafic aérien (ATM). Si cette technologie offre des opportunités significatives en matière de connectivité et de performance, elle soulève également des défis en termes de compatibilité et de sécurité avec les systèmes aéronautiques existants.

1.5.1 Communication

La 5G améliore considérablement les capacités de communication dans le domaine aéronautique. Grâce à ses débits élevés, sa latence réduite et sa fiabilité accrue, elle permet des échanges de données quasi instantanés entre les aéronefs, les contrôleurs aériens et les bases opérationnelles au sol.

Ces améliorations sont essentielles pour renforcer la sûreté des vols et optimiser la gestion du trafic aérien. La 5G facilite notamment la transmission en temps réel de données météorologiques ou d'informations de vol critiques, essentielles dans les environnements complexes ou congestionnés [23,24].

✓ *Exemple* : La gestion de l'espace aérien dense ou contesté bénéficie de la rapidité des échanges permis par la 5G, améliorant la prise de décision en temps réel.

1.5.2 Navigation

La technologie 5G contribue également à l'optimisation des systèmes de navigation. Ses capacités de précision et de couverture permettent de compléter les systèmes de positionnement actuels, tels que le GPS, en fournissant une redondance et une précision accrue, notamment dans les zones urbaines denses ou les environnements complexes où les signaux GNSS peuvent être dégradés [25].

Cette amélioration est particulièrement bénéfique lors des phases critiques du vol, comme les décollages et atterrissages, où la précision de la navigation est cruciale [26].

1.5.3 Surveillance

En matière de surveillance, la 5G permet une collecte, une analyse et une diffusion de données plus rapides et plus fiables.

Les systèmes de surveillance tirant parti de la 5G fournissent des informations en temps réel sur la position, la vitesse et l'altitude des aéronefs, renforçant la sécurité de l'espace aérien et la gestion des trajectoires de vol [23].

✓ *Exemple* : La 5G facilite le suivi précis de drones et de véhicules aériens autonomes, dont la présence est en pleine expansion dans l'espace aérien civil [27].

1.5.4 Gestion de trafic aérien (ATM)

La 5G est un catalyseur pour l'évolution de la gestion du trafic aérien (ATM). Elle permet une coordination optimisée entre les différents intervenants (contrôleurs, compagnies aériennes, gestionnaires d'aéroports), une gestion plus efficace des flux de trafic et une réduction des délais d'attente.

De plus, la 5G facilite l'intégration des nouvelles technologies, telles que les drones (UAV) et véhicules aériens autonomes, dans les systèmes ATM traditionnels, contribuant ainsi à un espace aérien plus fluide et sécurisé [23].

Selon l'OACI (2022), la 5G constitue une composante essentielle de la transition vers l'Aviation 4.0, favorisant l'adoption de technologies intelligentes pour une gestion de l'aviation plus performante et durable.

La figure 1.5 montre l'impact de la 5G sur le système CNS/ATM :

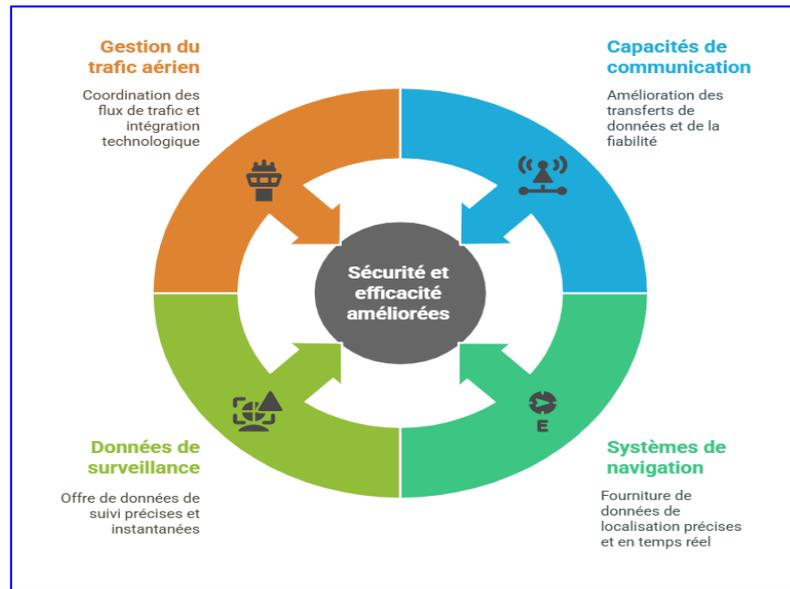


Figure 1. 4: Impact de la 5G de l'efficacité et la sécurité dans l'aéronautique [23, 25, 26,27].

1.6 Risques et défis liés à la 5G dans le contexte aéronautique

L'introduction de la 5G dans le secteur aéronautique ouvre des perspectives significatives en matière de connectivité et d'optimisation des opérations. Toutefois, cette technologie soulève également des risques et défis majeurs pour la sécurité des systèmes de communication, navigation et surveillance (CNS/ATM).

Le schéma ci-dessous synthétise les principaux risques et défis associés à l'intégration de la 5G dans le domaine aéronautique, notamment en matière d'interférences radio, de cybersécurité et de gestion du trafic aérien.



Figure 1. 5: Risques et défis liés à la 5G dans le contexte aéronautique [23,26, 24,28].

1.6.1 Interférences avec les systèmes aéronautiques

L'un des principaux risques identifiés est celui des interférences radioélectriques, en particulier avec les altimètres radar opérant dans la bande des 4,2 - 4,4 GHz. Les bandes de fréquence attribuées à la 5G, notamment autour de 3,5 GHz, sont suffisamment proches pour générer des interférences potentielles, affectant ainsi la précision des mesures d'altitude critiques lors des phases d'approche et d'atterrissage.

Des cas concrets ont été documentés, notamment aux États-Unis, où la Federal Aviation Administration (FAA) a émis des avertissements concernant le déploiement de la 5G à proximité des aéroports [26,28]. Ces préoccupations ont conduit à la mise en place de zones tampons et de restrictions d'émission dans certaines zones sensibles.

1.6.2 Cybersécurité

La complexité architecturale et la décentralisation des réseaux 5G introduisent de nouveaux vecteurs de menaces en matière de cybersécurité. L'interconnexion accrue entre les systèmes civils et aéronautiques nécessite des mesures de sécurité renforcées pour protéger les données sensibles et les systèmes critiques de l'aviation.

Selon un rapport de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA), il est impératif de mettre en œuvre des protocoles de cybersécurité robustes afin de garantir l'intégrité et la confidentialité des communications aériennes utilisant des réseaux 5G [28].

1.6.3 Gestion du trafic aérien (ATM)

L'intégration de la 5G dans les systèmes de gestion du trafic aérien (ATM) pose des défis importants en termes de coordination interopérable et de régulation internationale. Il est essentiel d'établir des normes et protocoles communs pour assurer la compatibilité entre les systèmes ATM traditionnels et les nouvelles solutions basées sur la 5G.

De plus, la formation continue des personnels de l'aviation est cruciale pour garantir une transition efficace vers ces nouvelles technologies. Le programme SESAR en Europe travaille actuellement sur des solutions visant à intégrer la 5G dans les systèmes ATM tout en assurant la sécurité et l'efficacité opérationnelle [23,24].

1.7 Enjeux et rythmes différenciés du déploiement 5G dans le monde

Le déploiement de la 5G varie fortement selon les régions du monde. Des écarts significatifs apparaissent en matière de couverture, de performance, de taux d'adoption et de stratégies spectrales. Le tableau suivant compare les approches des États-Unis, de l'Europe et de l'Asie, en mettant en lumière les choix technologiques et les usages qui structurent l'évolution mondiale de cette technologie.

Le tableau ci-dessous montre L'implémentation et l'efficacité de la 5G dans diverses zones du globe :

Tableau 1. 6: Le déploiement et les performances de la 5G dans différentes régions du monde [30,31].

Région	Mise en œuvre et déploiement	Performances moyennes	Adoption et usage	Technologie et spectre utilisé
États-Unis	Couverture à 98 % (2023), principalement via bandes basses et intermédiaires. mmWave limité aux grandes villes.	Débit moyen : 157 Mbps. Pointes > 1 Gbps en mmWave.	Adoption élevée, freinée par le coût des forfaits.	Stratégie « layer cake » : combinaison de bandes basses, moyennes et hautes.

Chapitre 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS /ATM

Europe	80 % des zones couvertes (2023), avec fortes disparités. Allemagne, France et Royaume-Uni en tête.	Débit entre 100 et 500 Mbps. Moyenne française 2023 : 221,1 Mbps (plus élevée du G7).	Adoption plus lente (~30 %), influencée par le Wi-Fi et la fragmentation du marché.	Usage prédominant des bandes intermédiaires (3,5 GHz) pour équilibre couverture/débit.
Asie	Couverture quasi-totale en Corée du Sud (98 %) et en Chine (89 %). 7 pays d'Asie-Pacifique dans le top 10 mondial.	Corée : moyenne 121,1 Mbps, record mondial à 746,25 Mbps. Chine : 171,6 Mbps.	Adoption massive (>700 Mbps d'abonnés en Chine en 2024).	Utilisation combinée des bandes basses, moyennes et hautes. Investissements massifs.

Ce tableau met en évidence les différences de stratégies de couverture, de performances réseau et de taux d'adoption selon les grandes régions mondiales, soulignant les enjeux d'équilibre entre vitesse, portée et accessibilité.

Afin d'illustrer visuellement les écarts mis en évidence dans le tableau précédent, la figure suivante présente une comparaison des indicateurs clés de la 5G (couverture, débit moyen, taux d'adoption) dans les principales régions du monde.

La figure ci-dessous montre une comparaison de la 5G selon la couverture, la vitesse et de l'adoption dans différentes régions :

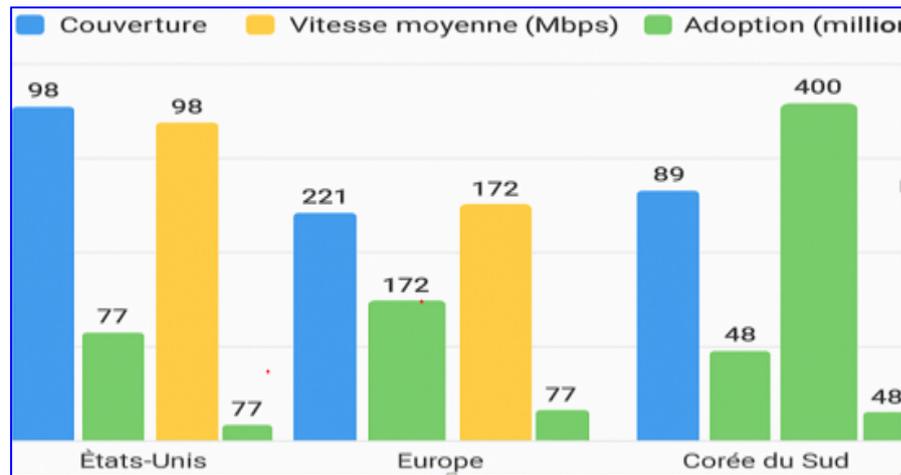


Figure 1. 6: Comparaison de la couverture, de la vitesse et de l'adoption de la 5G selon les régions [30,31].

Ce graphique met en évidence les variations significatives entre les États-Unis, l'Europe, la Chine et la Corée du Sud en termes de taux de couverture, performances mesurées (en Mbps) et nombre d'utilisateurs 5G, soulignant l'avance des pays asiatiques sur les plans technologique et commercial.

1.8 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir un cadre général autour de la technologie 5G et de ses implications dans le secteur aéronautique, notamment dans le contexte des systèmes CNS/ATM. L'analyse a mis en lumière les bénéfices attendus de la 5G, en particulier en matière de connectivité accrue, de gestion optimisée du trafic aérien, et d'intégration des drones et aéronefs autonomes.

Cependant, elle a également souligné des défis critiques, tels que les risques d'interférences avec les systèmes aéronautiques sensibles comme les radioaltimètres. En Algérie, comme dans d'autres pays, l'instauration de réglementations claires, de mesures de précaution strictes et d'une coopération étroite entre les autorités de télécommunication et l'aviation civile apparaît indispensable pour garantir la sécurité des opérations aériennes.

Les cadres réglementaires en cours, les expérimentations pilotes et les orientations internationales montrent une volonté de maîtriser le déploiement de la 5G tout en préservant la sûreté du secteur aérien. Ce socle institutionnel constitue ainsi un prérequis essentiel à toute évaluation des performances opérationnelles de la 5G dans l'aviation.

Chapitre 1 : La réglementation de la 5G en Algérie et son impact sur le système CNS /ATM

Ces constats justifient la nécessité d'enrichir cette approche réglementaire par une étude technique approfondie des communications radio dans des environnements réalistes. Le chapitre suivant s'inscrit dans cette démarche en modélisant la propagation des ondes 5G et en analysant leurs performances sous diverses conditions environnementales.

**CHAPITRE 2 : Modélisation et Analyse de la
Propagation des Ondes 5G pour les Drones et Avions
Autonomes**

2.1 Introduction

Dans les systèmes de communication sans fil, la propagation des ondes radio constitue un facteur déterminant des performances réelles d'un lien entre l'émetteur et le récepteur. Ce phénomène devient particulièrement complexe lorsqu'il s'applique à des communications en milieu aérien, notamment dans les cas impliquant des drones ou des avions autonomes, évoluant dans des environnements dynamiques marqués par des variations d'altitude, des conditions météorologiques changeantes et des reliefs diversifiés.

Une compréhension fine des mécanismes de propagation est indispensable pour garantir la fiabilité, la couverture et le débit des transmissions 5G dans de tels contextes. La modélisation de cette propagation permet d'estimer, à partir des paramètres physiques et environnementaux, la perte de puissance subie par un signal en fonction de la distance, de la fréquence utilisée et des obstacles rencontrés.

Plusieurs modèles ont ainsi été développés pour répondre à différentes configurations : certains sont optimisés pour les environnements urbains denses, d'autres pour les communications à haute altitude ou pour intégrer les effets atmosphériques.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à quatre modèles de propagation particulièrement pertinents dans le cadre des applications 5G aéronautiques, notamment pour les drones et aéronefs autonomes :

- Le modèle **de Friis** (modèle de base en espace libre)
- Le modèle **COST-231 Walfisch-Ikegami** (adapté aux environnements urbains)
- Le modèle **ITU-R P.530** (prise en compte des trajets multiples et des conditions météorologiques)
- Le modèle **ITU-R P.676** (effets atmosphériques, notamment l'absorption par les gaz)

Chacun de ces modèles sera présenté, analysé et comparé en détail dans les sections suivantes, en mettant en évidence leurs équations, leurs domaines d'application, ainsi que leur pertinence selon le type de plateforme (drone ou avion), l'environnement traversé, et l'altitude de vol.

2.2 Classification des aéronefs autonomes étudiés

Les aéronefs autonomes représentent aujourd’hui un axe de développement stratégique dans les domaines civil, industriel et militaire. Pour évaluer l’efficacité des communications 5G dans ce contexte, il est nécessaire de bien comprendre les caractéristiques propres à ces véhicules aériens.

Cette section présente d’abord un aperçu de l’évolution des drones et avions autonomes, avant de proposer une classification technique basée sur leur mode de fonctionnement, leur autonomie de vol, leur niveau d’intelligence embarquée et leur utilisation prévue.

2.2.1 Historique

L’évolution des véhicules aériens sans pilote (UAV) remonte au début du XXe siècle. Initialement conçus à des fins militaires, les premiers dispositifs apparaissent dès 1916, avec des prototypes basés sur des missiles téléguidés. Durant la Seconde Guerre mondiale, les missiles V1 et V2 ont constitué des exemples emblématiques de systèmes sans pilote.

Dans les années 1950, les drones sont utilisés pour la reconnaissance et l’entraînement (ex : Ryan FireBee durant la guerre du Vietnam). À partir des années 1990, la miniaturisation de l’électronique et la baisse des coûts ouvrent la voie à des drones civils développés par le secteur privé. [32, 33, 34, 35].

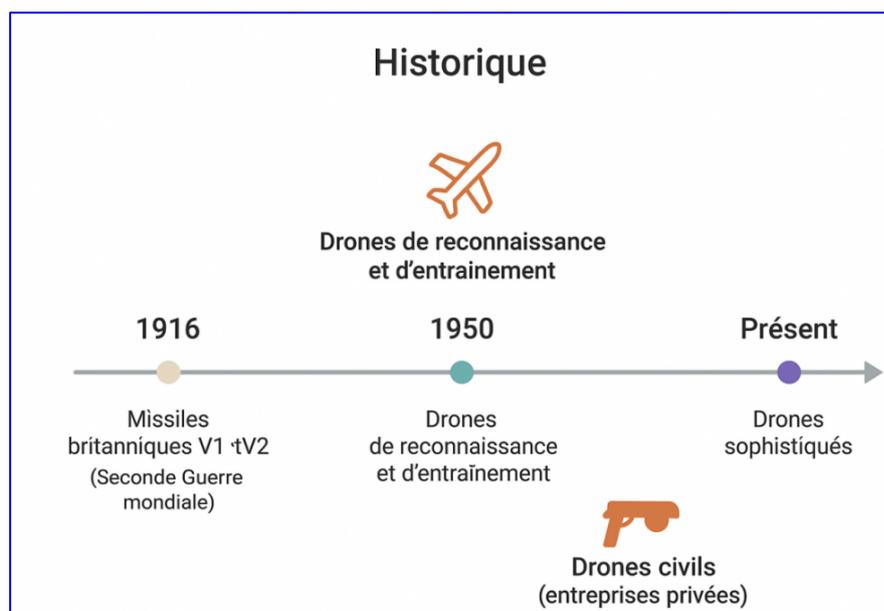


Figure 2. 1: L’évolution des véhicules aériens sans pilote (UAV) [32, 33, 34, 35].

2.2.2 Drones

Le terme "drone" désigne tout véhicule autonome sans pilote. En aéronautique, les termes UAV (véhicule), UAS (système complet), RPAS (pilote à distance) et SUA (petit UAV <20 kg) sont les plus utilisés, selon le niveau d'autonomie et le contexte d'usage. [36, 37, 38].



Figure 2. 2: Drone Mavic Pro 1.

2.2.3 Avion autonome

Le terme « avion autonome » fait référence à tout aéronef capable de réaliser des missions de vol sans intervention humaine directe à bord, grâce à des systèmes d'automatisation, de navigation et de prise de décision intégrés. Dans la littérature, on croise souvent les expressions « Autonomous Aircraft », « Unmanned Aircraft », ou encore « Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) », selon le degré d'autonomie et le contexte d'utilisation. Les avions autonomes se différencient des drones par leur taille, leur capacité de charge et leurs applications, qui sont souvent axées sur des missions de transport, de surveillance à grande échelle ou de mobilité aérienne avancée [68, 69, 70].



Figure 2 .3 : Avion autonome

2.2.4 Typologie des véhicules aériens sans pilote

Les UAV sont généralement classés selon leur configuration aérodynamique :

- **Multirotor** : facile à contrôler, adapté à la surveillance à courte portée.
- **Monorotor** : grande autonomie, capacité de charge plus élevée.
- **À voilure fixe** : couverture large, grande vitesse, pas de vol stationnaire.
- **Hybride VTOL** : combine vol stationnaire et longue portée, en développement [39].

Le tableau suivant présente une synthèse des principaux types de drones aériens en les comparant selon leurs avantages, leurs limites et leurs domaines d'application. Cette classification permet de mieux cerner les choix technologiques possibles en fonction des exigences opérationnelles, notamment dans le cadre de missions civiles, industrielles ou de surveillance.

Tableau 2. 1: Principaux types de drones et caractéristiques comparées [39].

Type de drone	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
Monorotor	Stationnaire, décollage vertical, bonne endurance, capacité de charge élevée	Plus complexe à piloter, maintenance délicate, risque de sécurité plus élevé	Balayage aérien, relevés LIDAR
Multirotor	Facile à manœuvrer, très stable, adapté aux petits espaces	Autonomie réduite, charge utile limitée	Photographie aérienne, inspections, livraisons locales
À voilure fixe	Vaste couverture, grande autonomie, vitesse élevée	Nécessite piste ou catapulte, pas de vol stationnaire	Cartographie, agriculture de précision, surveillance linéaire
Hybride VTOL	Combine décollage vertical et vol longue distance	Moins performant en vol stationnaire ou rapide, encore en phase de développement	Logistique, livraison de charges sur moyennes distances

Afin d'illustrer visuellement les principales catégories de drones décrites précédemment, les figures suivantes présentent les quatre architectures les plus répandues : le drone multirotor, le drone monorotor, le drone à voilure fixe et le drone hybride à décollage et atterrissage vertical (VTOL). Ces représentations permettent de mieux appréhender les différences de conception, de performances et d'usage entre ces types d'aéronefs.

La figure ci-dessous représente les principaux types de véhicules aériens :

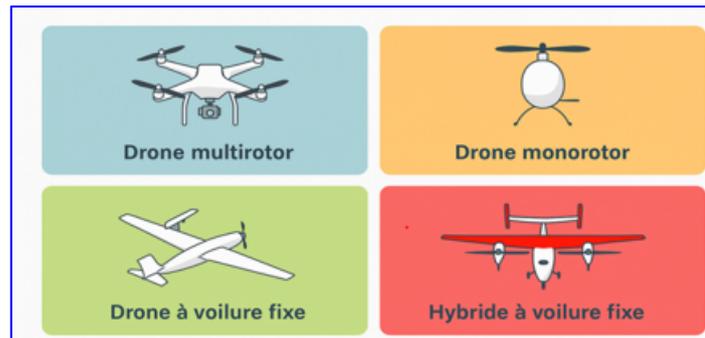


Figure 2. 4 : Représentations visuelles des principaux types de véhicules aériens [39].

2.2.5 Applications des drones

L'utilisation des drones a considérablement évolué ces deux dernières décennies, grâce à leur souplesse, leur capacité d'accès à des zones difficiles et leur efficacité. Ils sont désormais utilisés dans deux grandes catégories : civile et militaire. Les principales applications incluent la livraison de marchandises, l'agriculture de précision, la recherche scientifique, ainsi que la surveillance stratégique et les opérations militaires spécialisées.

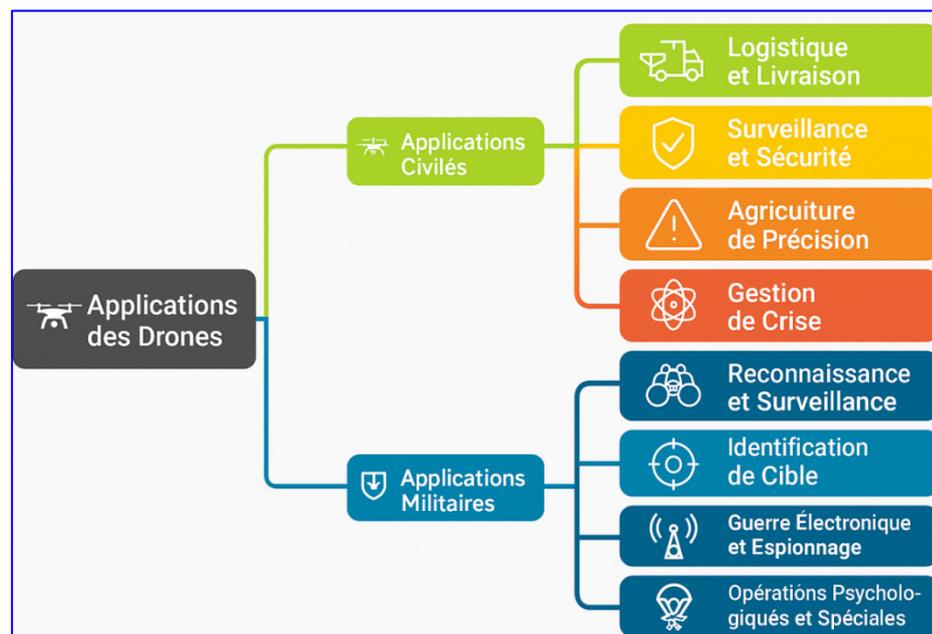


Figure 2.5 : Arbre des principales applications civiles et militaires des drones [40]

Cette représentation schématique met en évidence la diversité des domaines d'utilisation des drones, structurée selon leur finalité civile ou militaire.

2.2.6 Applications des avions autonomes

L'utilisation des avions autonomes a connu une véritable explosion ces dernières années, tant dans les domaines civils que militaires. Voici quelques-unes de leurs principales applications :

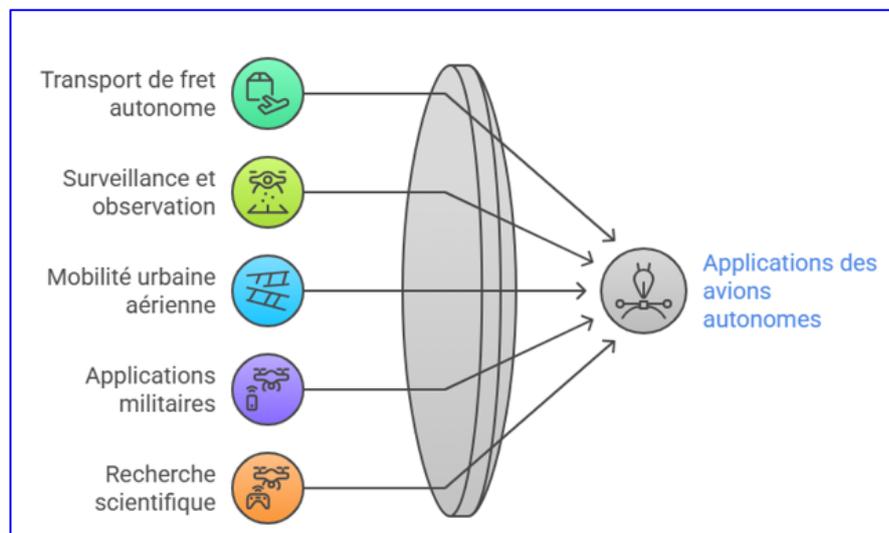


Figure 2.6 : applications des avions autonomes [68, 69,70].

- **Transport de fret autonome** : Livraison de marchandises sur de longues distances ou dans des zones difficiles d'accès.
- **Surveillance et observation** : Surveillance de l'environnement, suivi de pipelines, et cartographie aérienne à grande échelle.
- **Mobilité urbaine aérienne** : Projets de taxis volants et de transport de passagers dans les grandes villes.
- **Applications militaires** : Missions de reconnaissance, logistique, ou soutien tactique sans pilote à bord.
- **Recherche scientifique** : Collecte de données atmosphériques, surveillance météorologique et missions d'exploration.

La variété des architectures et des applications permet d'adapter les avions autonomes aux besoins spécifiques des missions civiles, industrielles, scientifiques ou militaires [68, 69,70].

2.2.7 Comparaison entre drone et avion autonomes

Drones et avions autonomes sont tous deux sans pilote embarqué, mais diffèrent en taille, autonomie, usages, et complexité. Les drones sont généralement compacts, adaptés aux missions de courte à moyenne portée (livraison, surveillance, photographie). Les avions autonomes sont plus grands, conçus pour des vols longue distance, et capables d'embarquer des systèmes plus avancés.

Ces deux tableaux présentes une distinction générale entre drones autonomes et avions autonomes selon leurs définitions, dimensions et altitudes typiques.

Tableau 2. 2: Caractéristiques générales et technologiques[36, 40,43,66 ,70].

Critère	Drone autonome	Avion autonome
Définition	Véhicule aérien sans pilote à bord, de petite à moyenne taille, contrôlé automatiquement ou à distance.	Avion de grande taille, sans pilote à bord, capable de navigation automatique sur de longues distances.
Taille & poids	Compact et léger	Plus grand, parfois équivalent à des avions civils classiques
Autonomie	Courte à moyenne (30 min à quelques heures)	Moyenne à longue (plusieurs heures, voire dizaines d'heures)
Altitudes typiques	100 à 1 000 mètres	1 000 à 10 000 mètres
Contrôle	Basé sur GPS, capteurs IMU, caméras, LIDAR	Basé sur GNSS, radars, inertie, gestion de vol automatique
Charge utile (payload)	Caméras, capteurs, livraison de petits colis	Surveillance, cargo, données stratégiques
IA embarquée	Navigation autonome basique à moyenne	Navigation avancée, gestion de plans de vol complexes
Portée de communication	Souvent courte (Wi-Fi, radio, 4G/5G)	Longue portée (satellite, 5G, liaisons RF)

Tableau 2. 3: Applications et défis associés[36,40,66,68,70].

Critère	Drone autonome	Avion autonome
Applications typiques (Sécurité)	Surveillance de sites, reconnaissance	Patrouilles aériennes, surveillance de frontières
Applications typiques (Civil)	Livraisons, agriculture, cartographie	Transport de marchandises, missions d'observation
Applications typiques (Militaire)	Renseignement, ciblage, appui	Bombardement autonome, surveillance de haute altitude
Applications typiques (Recherche)	Observation environnementale (faible altitude)	Étude climatique ou atmosphérique (haute altitude)
Légalité / Régulation	Plus souple, mais restrictions dans certains espaces aériens	Fortement réglementé (aviation civile, militaire)
Résistance météo	Vulnérable au vent, pluie	Plus stable, mais exige bonne planification
Besoins en communication	Nécessite couverture 4G/5G locale ou lien direct	Besoin de couverture globale (satellite ou réseau cellulaire étendu)

Afin d'illustrer la diversité des plateformes aériennes concernées par les communications 5G, la figure ci-dessous présente deux types de vecteurs typiques : un avion-cargo autonome évoluant à haute altitude, et un drone léger équipé de GPS, opérant généralement à basse altitude. Ces deux catégories présentent des besoins et des contraintes distincts en matière de propagation radio, ce qui justifie une approche différenciée dans la modélisation des performances.



(a) : avion-cargo autonomes



(b) : drone GPS

Figure 2. 7 : Représentations d'un avion-cargo autonome (a) et d'un drone GPS compact(b).

2.2.8 L'impact de 5G sur les drones et les avions autonomes

La 5G a un impact significatif sur l'univers des drones en offrant des capacités avancées pour améliorer leur fonctionnement, leur connectivité et leurs applications dans divers secteurs.

- **Faible latence** : Contrôle en temps réel, pilotage précis et sécurisé.
- **Transmission de données volumineuses** : Vidéos HD, télédétection, analyses en direct.
- **Navigation et autonomie avancées** : Décisions intelligentes, évitement d'obstacles, missions autonomes complexes (grâce à l'IA et à la connectivité 5G).
- **Opérations collaboratives** : Coordination de flottes de drones pour la cartographie, la surveillance ou la logistique [41].

2.3 Principes de base de la propagation des ondes radio

2.3.1 Caractéristiques des ondes radio

La propagation des ondes radioélectriques dépend de plusieurs phénomènes physiques qui influencent leur comportement dans divers environnements, impactant ainsi la qualité des communications, notamment dans les réseaux 5G appliqués à l'aéronautique.

- **Réflexion** : Rebond des ondes sur des surfaces planes (sol, bâtiments), affecte la stabilité du signal.
- **Réfraction** : Déviation de trajectoire à travers des couches atmosphériques, utile pour les longues distances.

- **Diffraction** : Contournement d'obstacles (montagnes, bâtiments), plus marqué aux basses fréquences.
- **Absorption** : Atténuation par l'atmosphère ou les matériaux, très forte au-delà de 3 GHz (brouillard, béton, métal) [41,42].

La figure ci-dessous montre les différents Caractéristiques des ondes radio :

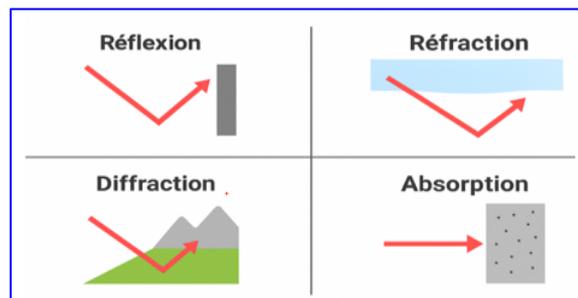


Figure 2. 8 : Caractéristiques des ondes radio [41,42].

2.3.2 Facteurs influençant la propagation

La qualité de la communication radio est déterminée par de nombreux éléments :

- **Conditions météorologiques** : pluie, neige, brouillard affectent particulièrement les bandes mmWave (>6 GHz).
- **Topographie** : les obstacles naturels ou urbains perturbent la ligne de visée.
- **Altitude** : plus elle est élevée, plus la propagation est proche de l'espace libre.
- **Mobilité** : le mouvement rapide induit l'effet Doppler et des handovers fréquents.

2.3.2.1 Conditions Météorologiques

Les phénomènes climatiques ont un impact direct sur l'atténuation et la distorsion des signaux radio, en particulier pour les fréquences élevées utilisées par la 5G :

- **Pluie** : la densité des précipitations (exprimée en mm/h) influence fortement l'atténuation du signal, en particulier au-delà de 6 GHz.
- **Neige** : ses effets sont comparables à ceux de la pluie, mais varient selon la densité des flocons et leur taille.
- **Brouillard et humidité** : ils augmentent l'absorption atmosphérique, en particulier dans les bandes millimétriques (mmWave).
- **Orages** : les éclairs génèrent des perturbations électromagnétiques aléatoires qui peuvent dégrader la qualité du lien radio [43,44].

2.3.2.2 Environnements Géographiques

Le type de terrain et les caractéristiques topographiques conditionnent le mode de propagation :

- **Zones rurales** : les signaux se propagent de manière relativement libre avec peu d'obstacles, ce qui se rapproche du modèle en espace libre.
- **Zones urbaines** : la densité du bâti entraîne des réflexions, diffractions et effets de trajets multiples (multipath), induisant un fading important.
- **Régions montagneuses** : le relief masque souvent la ligne de visée directe (LOS), provoquant des pertes par diffraction et une grande variabilité du signal [45].

2.3.2.3 Obstacles et Infrastructures

Les obstacles physiques, qu'ils soient naturels (collines, arbres) ou artificiels (bâtiments, pylônes), altèrent le signal par absorption, réflexion ou diffraction. Dans le contexte aéroportuaire, les structures métalliques comme les hangars ou les avions stationnés peuvent fortement perturber la propagation [46].

2.3.2.4 Altitude et Distance

- **À haute altitude (pour avion autonome 10000m et pour drone 1000m)**, la propagation s'effectue dans des conditions proches de l'espace libre, avec peu d'obstacles.
- **À basse altitude (pour avion autonome 1000m pour drone 100m)**, le signal est davantage exposé aux perturbations locales dues au relief, à l'environnement bâti et à la végétation [44].

2.3.3 Mobilité et effet Doppler

La vitesse de déplacement des drones (<25m/s) ou aéronefs autonomes (>25m/s) influence la stabilité du canal radio. Plus la vitesse n'est élevée, plus les variations fréquentielles dues à l'effet Doppler devient significatives, notamment dans les liaisons air-air entre UAVs ou avec des avions de ligne [43].

La figure ci-dessous montre les différents facteurs qui influencent les ondes radios :

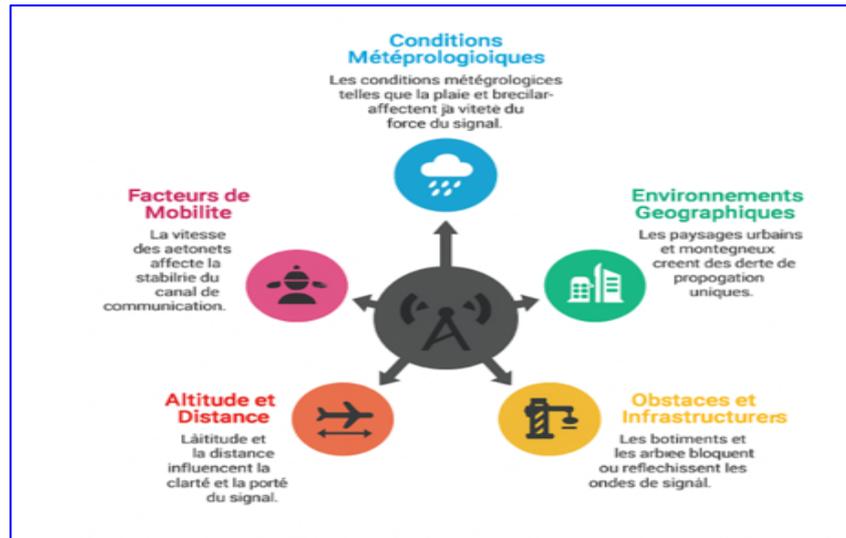


Figure 2. 9 : Facteurs affectant la propagation des ondes radio pour les drones[43,44,45,46].

2.4 Modèles de propagation pour la 5G

La modélisation de la propagation des ondes radio dans les systèmes CNS/ATM associés aux réseaux 5G en aéronautique est essentielle pour évaluer les performances des liaisons. Elle traduit les phénomènes physiques (réflexion, diffraction, atténuation) en modèles mathématiques prenant en compte l'environnement, la topographie et les conditions d'émission. Ces modèles permettent de prédire la perte de puissance du signal en fonction de la distance, du terrain et des conditions atmosphériques, garantissant ainsi une conception fiable des liaisons sans fil en aéronautique.

2.4.1 Classification des Modèles de Propagation

Les modèles de propagation radio sont généralement classés en deux grandes familles selon leur mode de construction : empiriques et déterministes comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau 2. 4: Comparaison entre Modèles Déterministes et Empiriques[3].

Type	Principe	Avantages	Limites
Empirique	Basé sur des mesures expérimentales	Simple, rapide, utile pour une première estimation	Moins précis, dépend du contexte

Déterministe	Basé sur les lois physiques (réflexion, diffraction)	Très précis, tient compte de l'environnement réel	Calcul lourd, nécessite des données 3D
--------------	--	---	--

2.4.2 Modèles pertinents pour l'aéronautique

Le tableau suivant offre une sélection de modèles adaptés aux communications air-sol, aux drones autonomes et aux scénarios CNS/ATM, en mettant en lumière leurs applications spécifiques, leurs avantages ainsi que leurs limites.

Tableau 2. 5: Modèles de Propagation Pertinents pour l'Aéronautique[3 ,44 ,49 ,56,57,65 ,70].

Modèle	Type	Usage	Avantage principal	Limite
Friis (FSPL)	Théorique	Espace libre, haute altitude	Très simple à calculer	Ignore les obstacles
COST-231 / Ikegami	Empirique	Urbain, zones bâties	Intègre réflexion/diffraction	Nécessite info sur bâtiments
ITU P-530	Empirique	Liaison troposphérique (grandes distances, LOS/NLOS)	Transmission au-delà de l'horizon	Ne s'applique pas aux environnements urbains
ITU P-676	Théorique/Empirique	Propagation atmosphérique (gaz, vapeur)	Modélise l'absorption des gaz	Valide pour certaines fréquences seulement
Ray Tracing / IRT	Déterministe	Environnement dense, 5G, mmWave	Très précis (multipath, diffraction)	Calcul intensif, modélisation 3D nécessaire

ITU-R P.838	Empirique	Atténuation par pluie	Spécifique aux conditions météo	Limité à certaines fréquences
	$L_{rain} = k \cdot R^\alpha \cdot d$			

2.5 _Formules et Calcul des pertes de signal

L'analyse des pertes radio est cruciale pour dimensionner correctement les communications 5G aéronautiques. Ces pertes dépendent de la distance, des obstacles, des conditions météo et de la mobilité.

2.5.1 Pertes en espace libre (Free Space Path Loss - FSPL)

La perte en espace libre modélise l'atténuation subie par une onde électromagnétique se propageant sans obstacle entre un émetteur et un récepteur en ligne de visée (LOS). Elle est donnée par la formule :

$$FSPL = 20 \log_{10} d + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (2.1)$$

Où :

d : est la distance (en mètres ou kilomètres selon la formule)

f : la fréquence (en Hz ou MHz),

c : la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s).

Cette formule exprime la perte de puissance due à la propagation dans l'air libre, suivant la loi de l'inverse du carré de la distance.

✧ **Exemple 5G** : Pour 1 km à 28 GHz, FSPL est environ 100 dB, ce qui montre l'importance de la fréquence dans la perte. [47, 48].

2.5.2 Modele COST 231 Walfisch-ikegami

Il est basé sur la théorie de l'optique géométrique, où l'on considère la propagation de l'onde limitée en deux rayons. Il suppose par ailleurs, une structure idéale d'une ville avec une hauteur des bâtiments uniforme. Il est exprimé par la relation suivante :

$$A_{ff} = A_{ff0} + A_{ff1} \quad (2.2)$$

Avec :

A_{ff0} : affaiblissement en espace libre donné précédemment (modèle de BERTONI-WALFISCH) [57].

$$A_{\text{ffl}} = -5.8 - 10 \log_{10} (1 + (3 / L^2)) - \log_{10}(w) + 20 \log_{10} (hb - hm) + 20 \log_{10} (\sin(\varphi)) + 10 \log_{10}(f) \quad (2.3)$$

Avec :

- φ : orientation de la rue par rapport au rayon incident (en degré)
- h_b : hauteur moyenne des bâtiments
- L : coefficient de réflexion des bâtiments. Ikegami suppose que les bâtiments introduisent des affaiblissements de 6 dB

2.5.3 Modèle ITU P-676

Ce modèle calcule l'absorption par l'oxygène (O₂) et la vapeur d'eau (H₂O) :

$$Y = Y_{O_2} + Y_{H_2O} \quad (2.4)$$

- **A 60Ghz** : absorption dominante par O₂ (≈ 15 dB/km)
- **Bande 24-38 Ghz** : Atténuation combinée variant de 0,1 à 0,3 dB/km selon l'humidité [71].

2.5.4 Modèle ITU P-530

Pour les liaisons terrestres avec obstacles :

$$\text{Pertes} = L_{\text{fs}} + L_{\text{diff}} + L_{\text{atm}} + L_{\text{rain}} \quad (2.5)$$

- **Diffraction** : Calculée via modèle Deygout ou Epstein-Peterson
- **Effets meteo** : Atténuation supplémentaire jusqu'à 20 dB/km en fortes pluies (bande mmWave) [71].

2.5.5 Pertes dues aux obstacles

2.5.5.1 Pertes par pénétration dans les bâtiments (Building Penetration Loss - BPL)

Ces pertes dépendent des matériaux (verre, béton, métal) et peuvent atteindre plusieurs d

À titre d'exemple :

- Verre ordinaire : 2 à 5 dB
- Béton armé : 10 à 20 dB
- Métal : > 20 Db

2.5.5.2 Pertes par diffraction

Lorsque l'onde contourne un obstacle, une partie de son énergie est atténuée. Ce phénomène est modélisé par des approches telles que la théorie de Fresnel ou la méthode d'ITU-R P.526.

2.5.5.3 Pertes par réflexion

La réflexion dépend de la surface (rugueuse ou lisse) et de l'angle d'incidence. Elle peut soit renforcer le signal (interférence constructive), soit le dégrader (interférence destructive). Ces pertes sont couramment intégrées dans les modèles semi-empiriques en milieu urbain [49].

2.5.6 Pertes dues à la mobilité

- **Effet Doppler** : Variation de fréquence perçue due au mouvement relatif, impactant la qualité de la communication, surtout avec drones ou avions autonomes.
- **Pertes dues aux changements rapides de position (handover)** : Transitions entre cellules pouvant générer des pertes temporaires ou dégradations du signal.

2.5.7 Impact des conditions environnementales sur la propagation des ondes 5G

2.5.7.1 Pertes dues à la pluie (Rain Attenuation) – Modèle ITU-R P.838

- ✧ La pluie cause une atténuation significative des signaux 5G, surtout aux fréquences élevées (mmWave).
- ✧ Le modèle ITU-R P.838 estime l'atténuation spécifique par :

$$A_{rain} = k \cdot R^\alpha \quad (2.6)$$

Où : R est le taux de précipitation (mm/h), k et α dépendent de la fréquence et de la polarisation

- ✧ **Exemple** : à 28 GHz avec 10 mm/h de pluie, l'atténuation est de 2 à 3 dB/km, ce qui peut fortement limiter la portée et la fiabilité des liens 5G.
- ✧ Plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation augmente rapidement avec l'intensité de la pluie [19, 20,21].

2.5.7.2 Pertes dues au brouillard et aux nuages (Fog and Cloud Attenuation)

Modèle ITU-R P.840

- ✧ Le brouillard et les nuages provoquent une atténuation par absorption des ondes, modélisée par :

$$A_{\text{fog}} = K \cdot L \quad (2.7)$$

Où : K est le coefficient d'atténuation (fonction de la fréquence et des propriétés du brouillard/nuage), L est la distance traversée

- ✧ **Exemple** : à 60 GHz, l'atténuation due au brouillard varie de 0,1 à 0,5 dB/km, ce qui reste faible mais non négligeable pour les liaisons longues ou très sensibles [53, 54,55].
- ✧ Pertes dues à la neige et à la glace (Snow and Ice Attenuation)

Les pertes dues à la neige et à la glace sont traitées dans la recommandation ITU-R P.530, qui propose un modèle pour estimer l'atténuation sur les liaisons radio terrestres en présence de précipitations solides (neige fondante, neige humide).

➤ **Formule générale**

$$A_{\text{snow}} = a \cdot S^b \quad (2.8)$$

Où :

- ✧ A_{snow} est l'atténuation spécifique (dB/km),
- ✧ S est le taux de chute de neige (mm/h),
- ✧ a et b sont des coefficients dépendant de la fréquence et du type de précipitation.

➤ **Procédure selon ITU-R P.530**

- ✧ Déterminer si la liaison traverse la couche de fonte (melting layer), car l'atténuation par la neige fondante est généralement plus forte que par la pluie seule.
- ✧ Si la liaison est affectée par la neige fondante, on utilise un facteur multiplicatif appliqué à l'atténuation par la pluie pour obtenir l'atténuation combinée pluie/neige fondante.
- ✧ Si la liaison est toujours au-dessus ou en dessous de la couche de fonte, l'atténuation par précipitation solide peut être négligée ou prise comme l'atténuation par la pluie seule.

- **Exemple** : À 28 GHz et pour une chute de neige de 5 mm/h, l'atténuation typique est comprise entre 0,5 et 1 dB/km, ce qui confirme la sensibilité des liaisons millimétriques à ce phénomène [56,57].

2.5.7.3 Pertes dues à l'absorption atmosphérique (Atmospheric Absorption)

- **Modèle ITU-R P.676** : Le modèle ITU-R P.676 décrit l'atténuation du signal due aux gaz atmosphériques, principalement l'oxygène et la vapeur d'eau, sur les trajets terrestres et inclinés. L'atténuation totale A_{atm} (en dB) est calculée par :

$$A_{atm} = \gamma \cdot d \quad (2.9)$$

Où :

γ : est le coefficient d'atténuation spécifique (dB/km), fonction de la fréquence, température, pression atmosphérique et humidité

d : est la distance du trajet en kilomètres.

- À 60 GHz, l'atténuation est particulièrement élevée (environ 15 dB/km) en raison d'une bande d'absorption large et intense de l'oxygène à cette fréquence, ce qui limite la portée des communications 5G dans cette bande. [58, 59,60]

2.5.7.4 Pertes dues aux variations de température et d'humidité

- **Modèle ITU-R P.453**

- ✧ Le modèle ITU-R P.453 fournit une méthode précise pour estimer l'indice de réfraction radio atmosphérique en fonction de la pression sèche, de la pression totale, de la pression de vapeur d'eau et de la température absolue. Ce modèle permet ainsi de quantifier l'impact des variations de température et d'humidité sur la propagation des ondes radio.

- ✧ La partie humide de la réfraction radio, liée à la vapeur d'eau, est calculée par une formule dépendant de la pression de vapeur d'eau et de la température, ce qui influence directement l'atténuation du signal, notamment dans les bandes de fréquences élevées utilisées en 5G.

- ✧ Dans les zones tropicales, où l'humidité et la température sont élevées et variables, l'atténuation due à ces facteurs peut augmenter significativement, affectant la qualité de la liaison radio et nécessitant une prise en compte dans la planification des réseaux [61,62].

2.5.8 Calcul de la puissance reçue

La puissance reçue constitue un indicateur fondamental pour évaluer la qualité du lien radio entre un émetteur (station au sol, drone ou avion) et un récepteur. Elle permet d'estimer si le signal est suffisamment fort pour assurer une transmission fiable, sans erreur ni coupure significative.

La formule générale utilisée pour estimer la puissance reçue, exprimée en décibels milliwatts (dBm), est la suivante :

$$P_{rx}ext(dBm) = P_{tx}ext(dBm) + G_{tx}ext(dBi) + G_{rx}ext(dBi) - L_{totale}est(Db) \quad (2.10)$$

Cette expression prend en compte :

- La puissance d'émission, typiquement imposée par la réglementation ou les capacités de l'émetteur.
- Le gain d'antenne à l'émission et à la réception, qui amplifient le signal.
- Les pertes totales, incluant les pertes en espace libre, les effets d'atténuation atmosphérique, les obstacles physiques (bâtiments, végétation), la pluie ou encore le brouillard.

Une valeur trop faible de peut entraîner une dégradation du débit ou une perte complète de la liaison. Avec :

- ✓ P_{tx} : puissance d'émission (dBm),
- ✓ G_{tx} et G_{rx} : gains des antennes (dBi),
- ✓ L_{totale} : pertes de propagation totales (dB), incluant l'espace libre, la pluie, l'atmosphère, etc.

2.5.9 Calcul du SNR (Signal-to-Noise Ratio)

Le rapport signal sur bruit (SNR) est une grandeur clé pour évaluer la qualité d'une liaison radio. Il exprime le niveau du signal utile reçu par rapport au bruit thermique de fond. Plus le SNR est élevé, plus la communication est fiable et moins elle est sujette aux erreurs.

Le SNR est défini par la relation : $SNR = P_{rx} - P_{bruit}$ (2.11)

Avec :

- ✓ P_{rx} : puissance reçue du signal (en dBm),
- ✓ P_B : puissance du bruit thermique (en dBm), généralement constante pour une température et une bande passante données.

Un SNR positif indique que le signal dépasse le bruit ambiant, condition essentielle pour permettre la démodulation correcte de l'information. À l'inverse, un SNR trop faible (souvent < 0 dB) entraîne une détérioration importante du débit, voire une perte de synchronisation.

Le SNR influence directement le débit binaire maximal théorique que peut transmettre le canal sans erreur, comme le prévoit la formule de Shannon. C'est pourquoi il constitue une métrique centrale dans les évaluations de performance des communications 5G dans des environnements complexes. Avec la puissance du bruit thermique, calculée par :

$$P = K \cdot T \cdot B \quad (2.12)$$

Où :

- K: constante de Boltzmann,
- T: température (Kelvin),
- B: bande passante (Hz).

2.5.10 Débit Théorique et Influence du SNR

Le débit binaire maximal théorique, c'est-à-dire la quantité d'informations transmises sans erreur, est directement influencée par le SNR. Il peut être estimé à l'aide de la formule de Shannon :

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR}_{\text{linéaire}}) \quad (2.13)$$

Où :

- C est le débit maximal (en bits par seconde),
- B est la bande passante (en Hz),
- $\text{SNR}_{\text{linéaire}}$ est le rapport signal sur bruit exprimé en valeur linéaire (et non en dB).

Pour convertir le SNR de décibels vers une forme linéaire :

$$\text{SNR}_{\text{lineaire}} = 10^{\text{(SNR (dB)/10)}} \quad (2.14)$$

Cette relation montre que :

Une bande passante élevée permet d'augmenter le débit, mais rend la liaison plus sensible au bruit.

Un SNR élevé permet de transmettre davantage d'informations de manière fiable.

Ainsi, le débit dépend conjointement de la qualité du lien radio (SNR) et des paramètres techniques comme la bande passante disponible. Dans un environnement 5G, maintenir un bon SNR est donc essentiel pour exploiter les capacités de très hauts débits offerts par cette technologie, notamment pour les communications en milieu aérien avec des drones ou avions autonomes.

2.6 Application des modèles de propagation et des pertes aux drones et avions autonomes

L'efficacité des communications 5G entre drones/avions autonomes et stations au sol dépend fortement de l'environnement opérationnel. Cette section présente les pertes typiques et les solutions selon trois grands types d'environnement : urbain, rural et aéroportuaire.

2.6.1 Environnement urbain

Les zones urbaines denses posent des défis majeurs : réflexions multiples, diffraction limitée, absorption par les bâtiments, fading important, effet canyon urbain.

a. Principaux phénomènes et modèles adaptés

- **Réflexion** : multipath → fluctuations du signal → COST-231, Walfisch-Ikegami, 3GPP TR 38.901
- **Diffraction** : obstacles cachant le signal → zones d'ombre → Walfisch-Ikegami
- **Absorption** : pertes par les matériaux → portée réduite → Hata-Okumura, 3GPP ;
- **Effet canyon** : canaux directionnels entre immeubles → perte imprévisible → Ikegami.

b. Impact typique sur les communications drone-station

- Réduction de portée, zones NLOS, instabilité du lien (fading, latence)
- Solutions : relais, réseaux maillés, QoS adaptative, antennes directionnelles

2.6.2 Environnement rural

Les zones rurales présentent moins d'obstacles artificiels mais des contraintes naturelles : relief, végétation, humidité, diffraction large.

a. Phénomènes courants et modèles associés

Diffraction/relief : couverture partielle → Hata rural, ITU-R P.1546

Absorption par végétation : pertes fréquentes sous pluie/forêt → ITU-R P.1546

Réflexion sur sol ou plans d'eau : trajets multiples → fading aléatoire

b. Impact

- Couverture irrégulière selon l'altitude et la topographie
- Nécessité de voler plus haut ou d'employer des relais pour conserver la LOS

2.6.3 Environnement aéroportuaire

Proximité des infrastructures critiques (radars, ILS, balises), matériaux métalliques, mobilité élevée.

a. Risques identifiés

- ✓ **Interférences radio** : surcharge spectrale → nécessité de filtrage, respect des bandes ITU/ICAO
- ✓ **Réflexion/multipath** : surfaces métalliques → erreurs de réception → modèles 3GPP Airport
- ✓ **Masquage** : hangars, avions stationnés → zones d'ombre
- ✓ **Effet Doppler** : forte mobilité → compensation nécessaire
- ✓ **Contraintes réglementaires** : sécurité aérienne impose des limites de puissance/fréquence

b. Conséquences pour les communications

- Risque de coupure lors des phases critiques (approche/atterrissage)
- Intégration nécessaire dans les systèmes de gestion du trafic (UTM/ATM) [33, 34,35].

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases techniques nécessaires à l'étude des communications 5G appliquées aux drones et avions autonomes. Après avoir présenté la classification et les caractéristiques spécifiques de ces aéronefs, l'accent a été mis sur les phénomènes physiques de propagation des ondes radio et sur les modèles mathématiques permettant de les simuler.

L'analyse des environnements opérationnels (urbain, rural, aéroportuaire) a montré que la nature du terrain, les obstacles, la météo et la mobilité ont un impact direct sur la qualité des liaisons sans fil. La sélection adéquate des modèles de propagation (empiriques ou déterministes) est donc essentielle pour prédire avec justesse les pertes de signal et optimiser les performances réseau dans chaque scénario.

Cette compréhension approfondie constitue un socle indispensable pour la suite du travail, notamment pour la simulation, l'analyse comparative et l'adaptation des modèles aux contraintes spécifiques des systèmes CNS/ATM et aux applications 5G aéronautiques.

CHAPITRE 3 : Simulation et analyse des performances de la 5G

3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la simulation et l'analyse des performances de la 5G appliquée aux drones et aux avions autonomes dans divers environnements. Les simulations sont réalisées à une fréquence de 3,5 GHz, représentative des bandes 5G, et prennent en compte des paramètres clés tels que la puissance d'émission, les gains d'antenne, la bande passante, la température ambiante et les altitudes simulées pour les drones (100 m à 1 000 m) et les avions (1 000 m à 10 000 m). Quatre environnements typiques sont étudiés : suburbain pluvieux, rural neigeux, urbain standard et montagneux brumeux, chacun avec des caractéristiques et des effets spécifiques sur la communication. Les simulations utilisent quatre modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU-R P.530, ITU-R P.676) pour évaluer les pertes de propagation et extraire les métriques de performance clés : puissance reçue, SNR et débit de données.

Dans le contexte de la simulation des performances 5G pour les drones et les avions autonomes, MATLAB offre plusieurs avantages clés :

- **Calcul Numérique Avancé** : MATLAB excelle dans l'exécution de calculs complexes, tels que ceux impliqués dans les modèles de propagation radio (Friis, Ikewa, ITU-R P.530, ITU-R P.676) et le calcul des métriques de performance (puissance reçue, SNR, débit de données).
- **Environnement de Programmation** : MATLAB fournit un environnement de programmation flexible qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de développer des scripts et des fonctions pour automatiser les simulations, analyser les données et générer des résultats.
- **Visualisation des Données** : MATLAB offre de puissantes capacités de visualisation, permettant de créer des graphiques et des figures pour représenter les résultats de la simulation de manière claire et concise. C'est crucial pour interpréter les tendances et les relations entre les paramètres (altitude, environnement, modèle de propagation, etc.) et les performances du système 5G.

3.2 Paramètres de Simulation

Les simulations sont réalisées pour une fréquence de **3,5 GHz**, représentative des bandes 5G. Les paramètres principaux incluent :

- **Puissance d'émission (P_{tx})** : 43 dBm
- **Gains d'antenne** : 18 dBi (émission), 24 dBi (réception)
- **Bande passante (B)** : 10 MHz
- **Température ambiante** : 290 K
- **Altitudes simulées** :
 - **Drones** : de 100 m à 1 000 m
 - **Avions** : de 1 000 m à 10 000 m

- **Distance horizontale fixe** : 1 km

3.3 Environnements simulés

Quatre environnements typiques sont étudiés :

a. Suburbain pluvieux (pluie modérée à forte, 25 mm/h)

➤ Description

Une zone périurbaine où les maisons individuelles et les immeubles de 2 à 5 étages se côtoient, le tout dans un cadre où la pluie tombe modérément à fortement, avec un débit de 25 mm/h. Cela évoque des orages d'été ou des averses intenses.

➤ Effets principaux sur la communication

- La pluie cause une atténuation (scattering et absorption)
- Les toits et murs réfléchissent le signal de manière multiple
- On observe des interférences faibles à modérées

b. Rural neigeux (atténuation par cristaux de glace)

➤ Description

Une zone peu urbanisée, souvent plate ou légèrement vallonnée. En hiver, la neige dense ou en suspension (avec des cristaux de glace dans l'air) est omniprésente. Les obstacles sont rares, avec des champs et des forêts clairsemées.

➤ Effets principaux sur la communication

- La diffusion et l'absorption sont causées par les cristaux de glace

- Perturbation multipath faible
- Le signal reste globalement clair, mais il est affecté par la neige à une altitude moyenne

c. Urbain standard (multipath modéré)

➤ **Description**

Un centre-ville qui regorge de gratte-ciel, de rues étroites et de zones industrielles. Il est associé à de nombreux obstacles qui provoquent un grand nombre de réflexions, diffractions et réfractions.

➤ **Effets principaux sur la communication**

- Phénomènes de multipath très fréquents
- Fade rapide – soit Rayleigh, soit Rician
- ISI élevé

d. Montagneux brumeux (fortes pertes atmosphériques)

➤ **Description**

Les régions hautes et accidentées, comme les montagnes soumaquent, contribuent grandement à l’absorption de l’énergie radiative fréquemment, le brouillard, les nuances épaisses ou l’extrême humidité. En fait, la visibilité y est limitée et l’air est comprenant des particules en suspension.

➤ **Faits saillants concernant la communication :**

- Plus d’absorption atmosphérique secondaire à la brume
- Les pertes attribuables à la diffraction des reliefs
- Presque pas de visée directe, NLOS prédominant.

3.4 Modèles de Propagation

Quatre modèles sont utilisés pour simuler les pertes de propagation :

Tableau 3. 1: Les équations de modèles de propagations

Modeles de propagation	Equations
Friis	$L=32.45+20\log_{10}(f) +20\log_{10}(d)$
Ikewa	$Aff1=-5.8-10\log(1-hm/hb)+20\log(hb-hm)+20\log(w)+10\log(f)$
ITU-R P.530	$L=Lfs+Ldiff+Latm+Lrain$
ITU-R P.676	$Latm=y \cdot d$

Chaque modèle intègre la distance, la fréquence, et des coefficients spécifiques à chaque environnement.

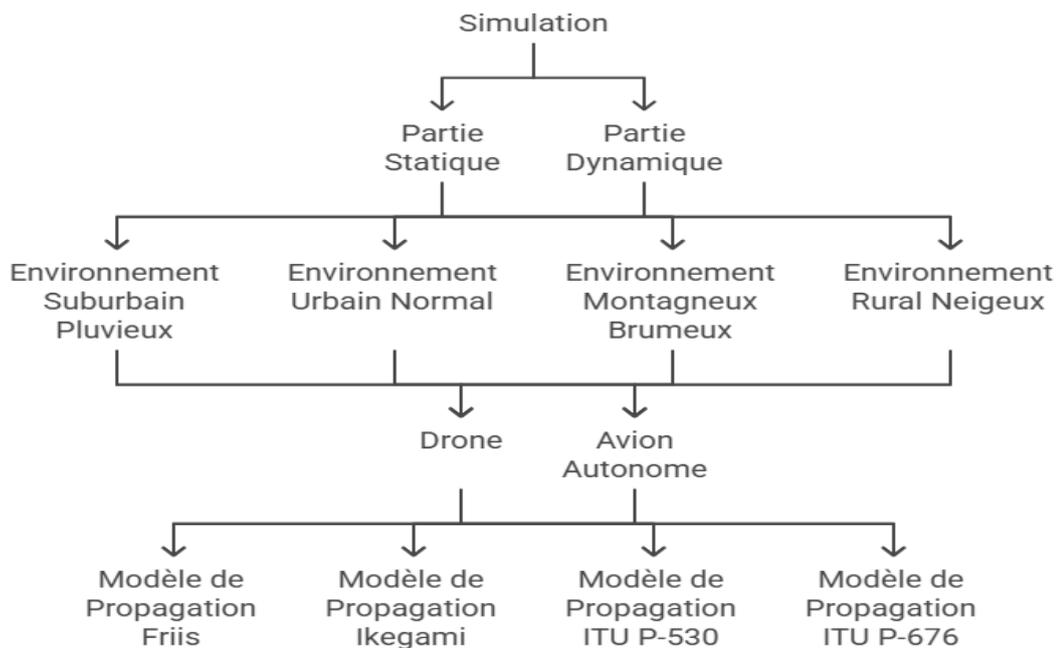
3.5 Métriques de Performance

Trois métriques principales sont extraites

- a. **Puissance reçue (P_{rx})** en dBm
- b. **SNR** en dB
- c. **Débit de données (C)** via la formule de Shannon

3.6 Méthodologie de simulation

Ce schéma explique la structure de simulation en montrant les différents environnements et les différents modèles de propagations utilisés :



3.7 Description de programme

➤ Le programme

- Simule les performances 5G selon l'altitude, l'environnement et le modèle de propagation.
- Compare la **puissance reçue**, le **SNR** et le **débit** pour chaque cas.
- Génère des **graphiques d'analyse comparative**.

➤ **PARTIE 1 : Initialisation des paramètres**

```
%% 1. Définir les paramètres de simulation
freq = 3.5e9; % Fréquence en Hz (3.5 GHz)
P_tx = 43; % Puissance d'émission en dBm
G_tx = 18; % Gain de l'antenne d'émission en dBi
G_rx = 24; % Gain de l'antenne de réception en dBi
d_horizontal = 1000; % en mètres - valeur modifiable ou dépendante du scénario
```

Le lien entre l'émetteur et le récepteur est modélisé en 3D, donc la distance dépendra aussi de l'altitude.

```
% Constantes physiques
k = 1.38e-23; % Constante de Boltzmann (J/K)
T = 290; % Température en Kelvin (environ 17°C)
B = 10e6; % Bande passante en Hz (10 MHz)
```

Ces paramètres sont utilisés pour calculer le **bruit thermique** (puissance du bruit sur la bande B) :

$$P_{\text{bruit}} = 10 \log_{10}(k \cdot T \cdot B) \text{ (en dBm)}$$

- **Altitudes simulées**

```
% Altitudes pour drones (jusqu'à 1 000 m) et avions (jusqu'à 10 000 m)
altitudes_drone = [100, 300, 500, 1000]; % Altitudes en mètres pour les drones
altitudes_avion = [1000, 5000, 10000]; % Altitudes en mètres pour les avions
```

- **Environnements testés**

```
environnements = {'suburbain_pluvieux', 'rural_neigeux', 'urbain_normal', 'montagneux_brumeux'};
```

Ces environnements influencent les **modèles de propagation** via des paramètres spécifiques.

3.8 Analyse globale

3.8.1 Suburbain pluvieux

- La figure 3.1 présente l'évolution de la puissance reçue (en dBm) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement suburbain pluvieux, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

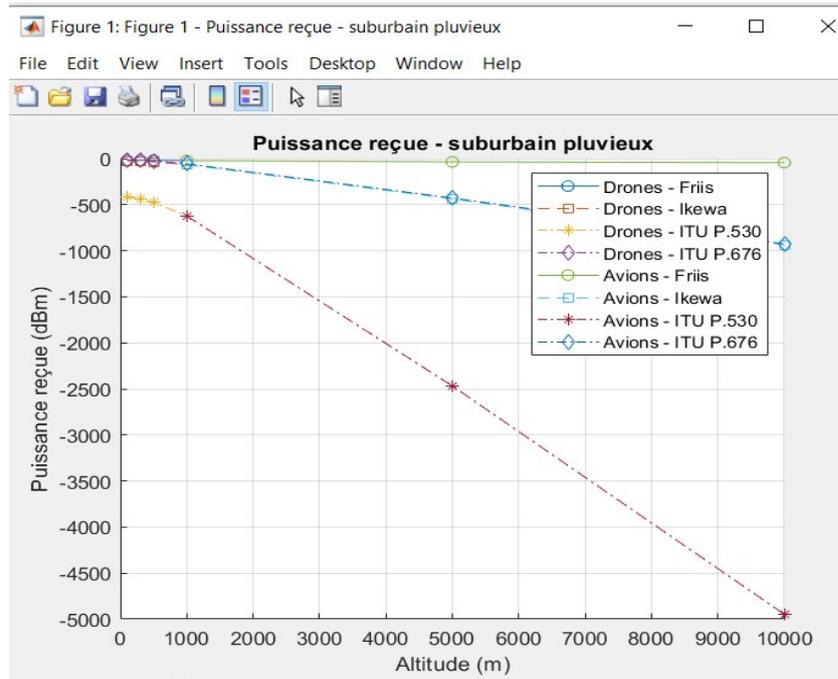


Figure 3. 1: "Puissance reçue - suburbain pluvieux"

- Analyse des courbes

Tableau 3.2 : analyse de la figure 3.1

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	Décroissance modérée	Puissance quasi constante, légère baisse	Modèle le plus optimiste
ITU P.530	Forte décroissance à haute altitude	Forte décroissance, plus sévère qu'avec drones	Modèle pessimiste pour avions
ITU P.676	Décroissance progressive, modérée	Décroissance progressive, modérée	Modèle intermédiaire
Ikewa	Chute drastique dès 5000 m, ~ -5000 dBm à 10 000 m	Chute catastrophique, ~ -5000 dBm à 10 000 m	Modèle le plus pessimiste, rend communication impossible

- La figure 3.2 montre l'évolution du rapport signal sur bruit (SNR, en dB) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement suburbain pluvieux, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676)

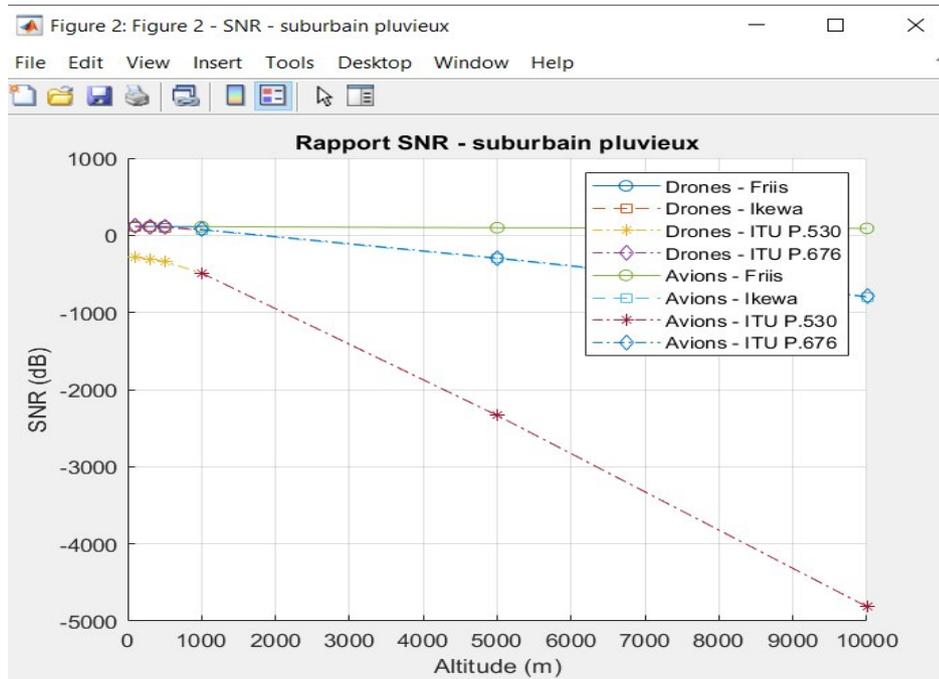


Figure 3. 2: Rapport SNR –suburbain pluvieux.

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.3 : analyse de la figure 3.2

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	SNR positif, décroissance légère jusqu'à 10 000 m	SNR presque constant, reste positif même à très haute altitude	Modèle très optimiste, sûrement moins réaliste
ITU P.676	SNR modérément décroissant, reste acceptable	SNR modérément décroissant, reste correct jusqu'à 10 000 m	Modèle intermédiaire, plus équilibré
ITU P.530	Chute rapide dès 4000 m, SNR très bas voire négatif à haute altitude	Décroissance sévère, SNR extrêmement bas (~ -5000 dB à 10 000 m)	Modèle pessimiste, communication impossible à grande altitude

Ikewa	SNR chute drastiquement dès 4000 m, devient négatif (~ -5000 dB à 10 000 m)	Chute dramatique dès 2000 m, SNR extrêmement faible à haute altitude	Modèle le plus pessimiste, bruit intense, lien quasi inutilisable
--------------	---	--	---

➤ La figure 3.3 présente l'évolution du débit (en bits/s) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement suburbain pluvieux, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

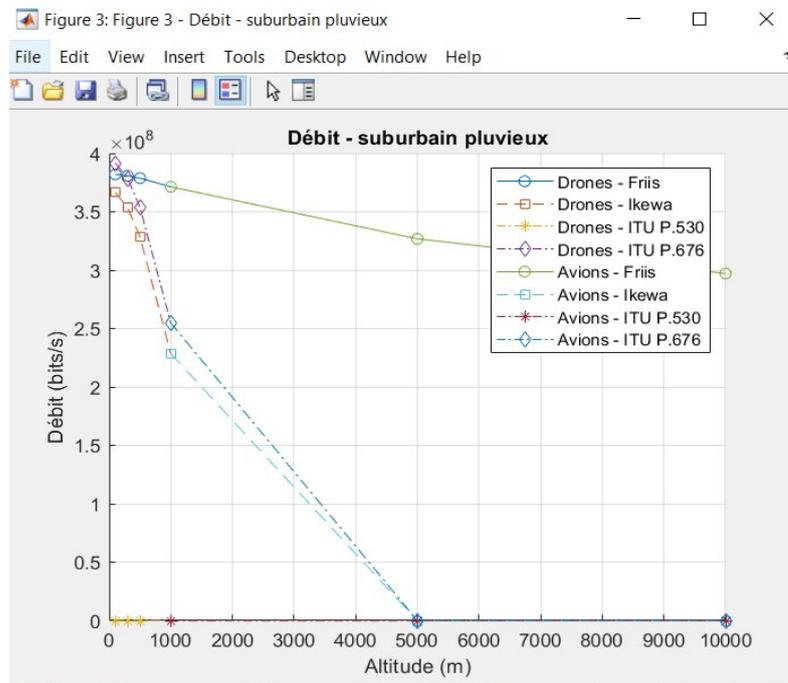


Figure 3.3: Debit – suburbain pluvieux.

Tableau 3.4 : analyse de la figure 3.3

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	Débit chute rapidement au-delà de 2000–3000 m, proche de zéro à haute altitude	Débit diminue, forte chute après 4000 m	Modèle pessimiste à haute altitude
ITU P.530	Débit chute brutalement dès 2000–3000 m, quasi nul à haute altitude	Diminution progressive, forte baisse après 4000 m	Modèle pessimiste, surtout après 4000 m

ITU P.676	Débit diminue vite avec l'altitude, quasi nul à partir de 3000 m	Débit baisse mais de façon modérée, moins brutal qu'avec Friis et ITU P.530	Modèle intermédiaire
Ikewa	Débit chute rapidement au-delà de 2000–3000 m, malgré son optimisme pour avions	Débit reste élevé même à 9000 m, décroissance lente, meilleure performance à haute altitude	Modèle le plus optimiste, surtout pour les avions

3.8.2 Rural neigeux

➤ La figure 3.4 montre l'évolution de la puissance reçue (en dBm) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement rural sous la neige, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

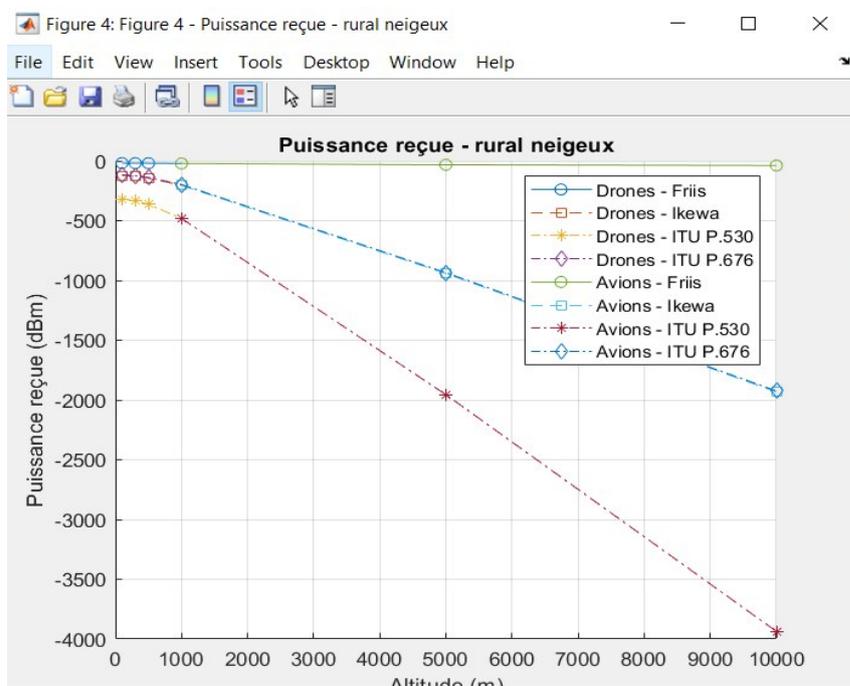


Figure 3. 4: Puissance reçue – rural neigeux

➤ **Analyse des courbes**

Tableau 3.5 : analyse de la figure 3.4

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	Décroissance moins brutale, mais puissance très faible au-delà de 2000 m	Décroissance progressive, mais baisse notable à haute altitude	Modèle intermédiaire, pas le pire mais loin d'être optimal

ITU P.530	Chute très abrupte, puissance extrêmement faible dès 2000 m	Très forte chute à haute altitude, puissance < -3000 dBm	Modèle très pessimiste, surtout en conditions neigeuses
ITU P.676	Décroissance rapide, puissance très faible dès 2000 m	Forte atténuation à haute altitude, puissance < -3000 dBm	Modèle pessimiste, sensible aux conditions neigeuses
Ikewa	Décroissance moins brutale, mais puissance faible au-delà de 2000 m	Meilleure performance, puissance relativement élevée jusqu'à 9000 m	Modèle le plus optimiste, surtout pour les avions

➤ La figure 3.5 présente l'évolution du rapport signal sur bruit (SNR, en dB) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement rural sous la neige, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676)

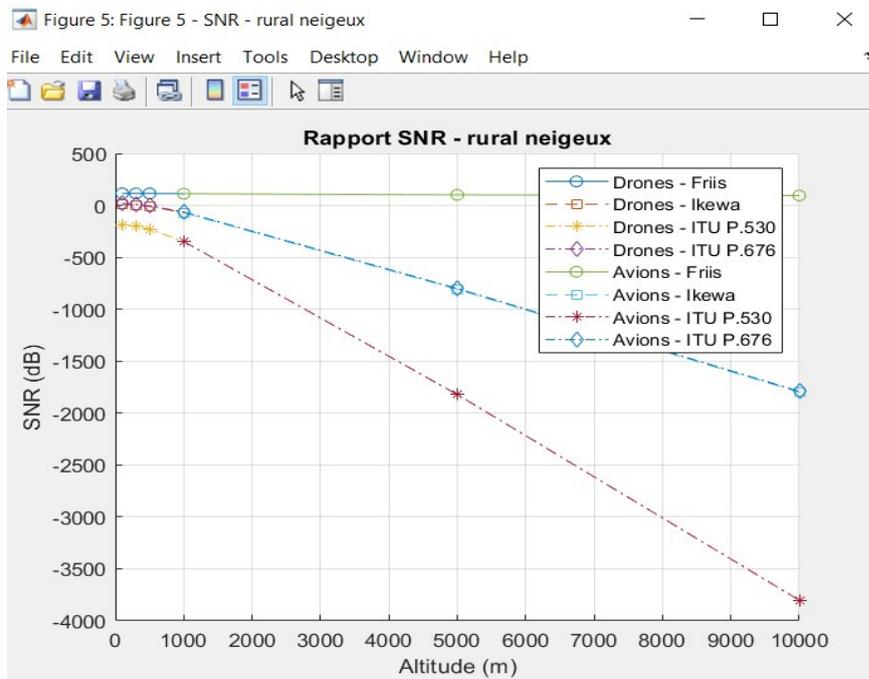


Figure 3. 5: Rapport SNR – rural neigeux.

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.6 : analyse de la figure 3.5

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	SNR reste positif ou proche de zéro jusqu'à 9000 m, qualité acceptable	SNR positif et stable jusqu'à 9000 m, communication fiable	Modèle optimiste, peu impacté par la neige
Ikewa	SNR positif jusqu'à 9000 m, performance solide	SNR positif et stable même à haute altitude	Modèle le plus optimiste

ITU P.530	SNR chute très vite dès basses altitudes, < -1000 dB dès 2000 m, communication impossible	Forte chute SNR, atteignant -3500 dB à 9000 m, communication impossible	Modèle très pessimiste sous neige
ITU P.676	Décroissance rapide, SNR extrêmement négatif dès basses altitudes, communication non viable	SNR extrêmement faible à haute altitude, communication impossible	Modèle pessimiste, très sensible aux conditions neigeuses

- La figure 3.6 montre l'évolution du débit (en bits/s) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement rural sous la neige, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

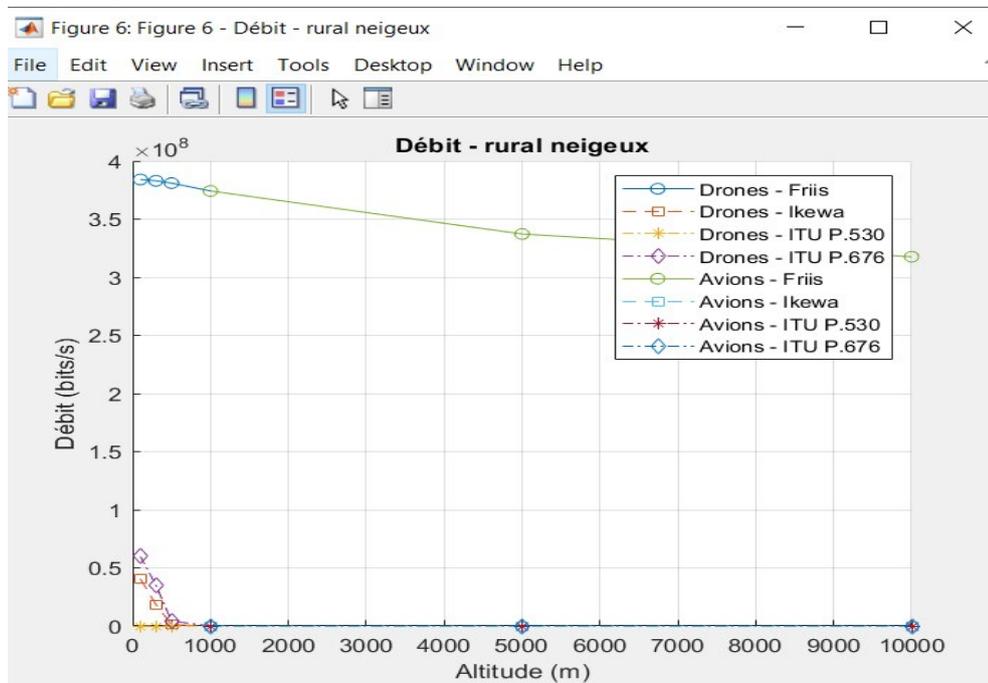


Figure 3. 6: Débit – rural neigeux.

- Analyse des courbes

Tableau 3.7 : analyse de la figure 3.6

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	Débit très faible dès <1000 m, chute rapide, quasi nul	Débit élevé (~3,5–4 ×10 ⁸ bits/s) même à 9000 m, très légère baisse	Très optimiste, peu sensible à altitude et neige (surtout pour avions)

Ikewa	Débit chute vite, quasi nul dès les basses altitudes	Débit quasi nul dès les plus basses altitudes, comme pour drones	Très pessimiste, sensible aux pertes neige
ITU P.530	Débit quasi nul dès <1000 m	Débit quasi nul dès les plus basses altitudes	Modèle pessimiste, fort impact de l'altitude + neige
ITU P.676	Débit quasi nul dès <1000 m	Débit quasi nul dès les plus basses altitudes	Modèle pessimiste, fort impact de l'altitude + neige

3.8.3 Urbain normal

➤ La figure 3.7 présente l'évolution de la puissance reçue (en dBm) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement urbain normal, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

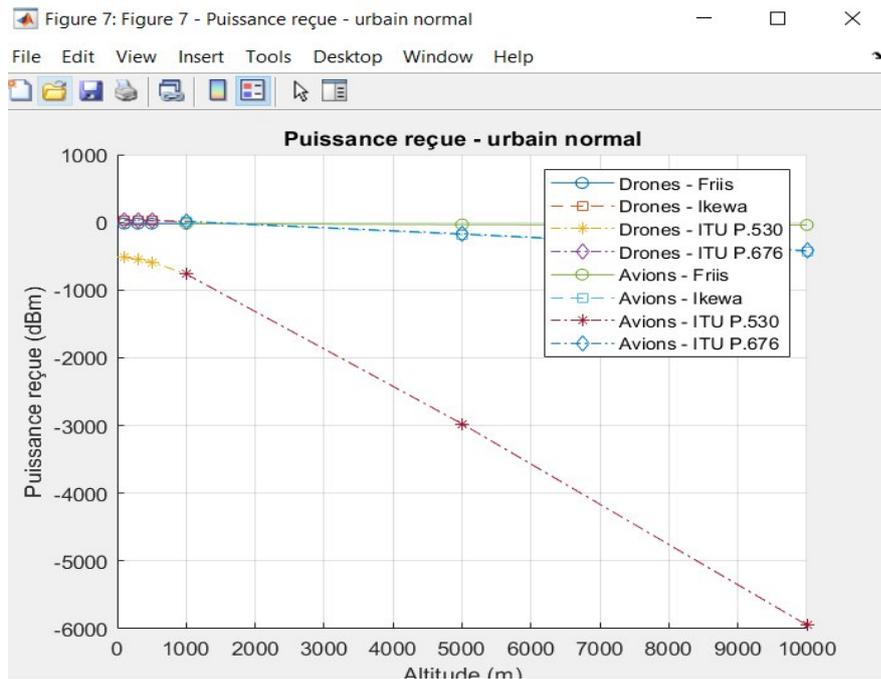


Figure 3. 7: Puissance reçue – urbain normal.

➤ **Analyse des courbes**

Tableau 3.8 : analyse de la figure 3.7

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	Puissance reçue stable (~0 dBm) jusqu'à 9000 m	Puissance stable (~0 dBm) jusqu'à 9000 m	Très optimiste, faible atténuation pour tous

Ikewa	Puissance reçue stable (~0 dBm) sur toute la plage d'altitude	Puissance stable (~0 dBm) jusqu'à 9000 m	Similaire à Friis, également très optimiste
ITU P.530	Légère baisse mais toujours proche de 0 dBm	Forte chute dès quelques centaines de mètres (jusqu'à -5000 dBm à 9000 m)	Très pessimiste pour les avions, mais modéré pour les drones
ITU P.676	Légère baisse, puissance toujours proche de 0 dBm	Chute rapide et extrême de la puissance jusqu'à -5000 dBm à haute altitude	Même tendance que P.530, mais légèrement plus pessimiste pour les avions

- La figure 3.8 présente l'évolution du rapport signal sur bruit (SNR, en dB) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement urbain normal, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

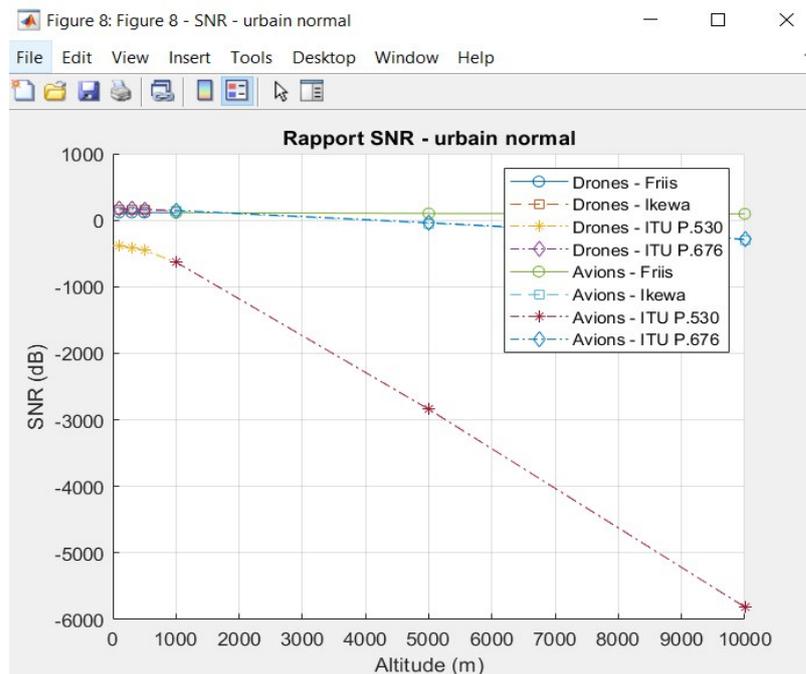


Figure 3. 8: Rapport SNR – urbain normal.

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.9 : analyse de la figure 3.8

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	SNR positif et stable (légère diminution avec altitude, toujours largement > 0 dB)	SNR positif et stable, bonne qualité de communication jusqu'à 9000 m	Très optimiste, bonne qualité de signal pour drones et avions
Ikewa	SNR positif et stable, légèrement inférieur à Friis, mais suffisant pour communication fiable	SNR positif et stable, similaire à Friis, maintien d'une bonne qualité de signal jusqu'à 9000 m	Optimiste, proche de Friis, bon pour drones et avions
ITU P.530	SNR positif, légèrement inférieur aux modèles optimistes, mais reste suffisant à toutes altitudes	SNR chute très rapidement, valeurs très négatives dès quelques centaines de mètres, impossible à 9000 m	Raisonné pour drones, très pessimiste pour avions à haute altitude
ITU P.676	SNR positif, légèrement inférieur à Friis/Ikewa, suffisant pour communication fiable	SNR extrêmement négatif à partir de faible altitude, jusqu'à -6000 dB à 9000 m, communication impossible	Même tendance que ITU P.530, très pessimiste pour les avions

➤ La figure 3.9 illustre l'évolution du débit (en bits/s) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement urbain normal, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

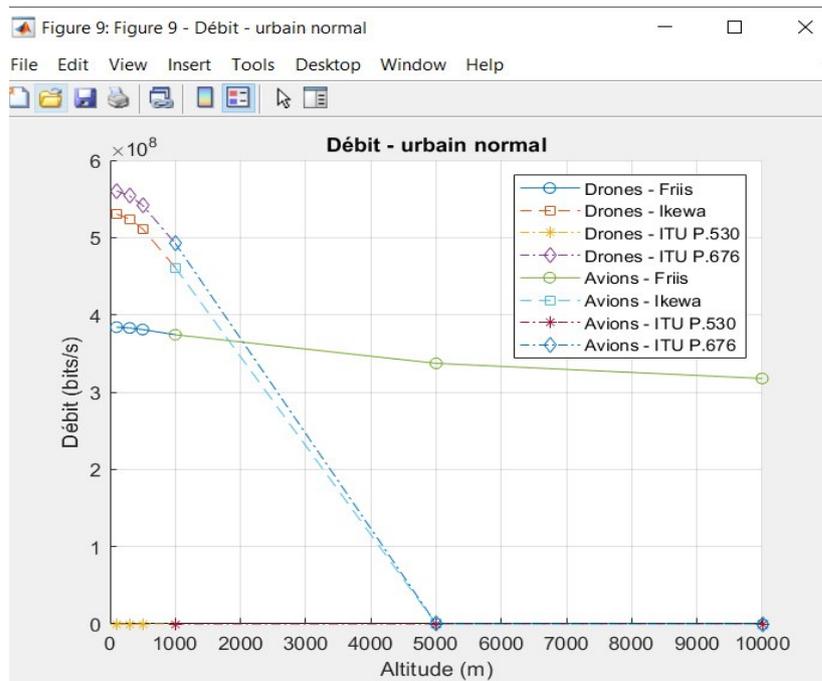


Figure 3. 9: Débit – urbain normal.

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.10 : analyse de la figure 3.9

Modèle	Drones	Avions	Commentaire
Friis	Débit initial élevé ($\sim 5,5 \times 10^8$ bits/s) à basse altitude, chute rapide, nul vers 4000 m	Débit élevé et stable ($\sim 3,5-4 \times 10^8$ bits/s) jusqu'à 10 000 m	Très optimiste, altitude impacte peu les avions, plus marqué pour drones
Ikewa	Débit initial élevé, chute très rapide, nul dès 2000 m	Débit chute très rapidement, nul dès les premières centaines de mètres	Réaliste, débit très limité à altitude élevée, même en urbain
ITU P.530	Débit nul dès les premières centaines de mètres	Débit nul dès les premières centaines de mètres	Très pessimiste, altitude détruit immédiatement la capacité de transmission
ITU P.676	Débit nul dès les premières centaines de mètres	Débit nul dès les premières centaines de mètres	Même tendance que ITU P.530, très pessimiste, aucun maintien de débit à altitude élevée

3.8.4 Montagneux et brumeux

- La figure 3.10 montre l'évolution de la puissance reçue (en dBm) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement montagneux et brumeux, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

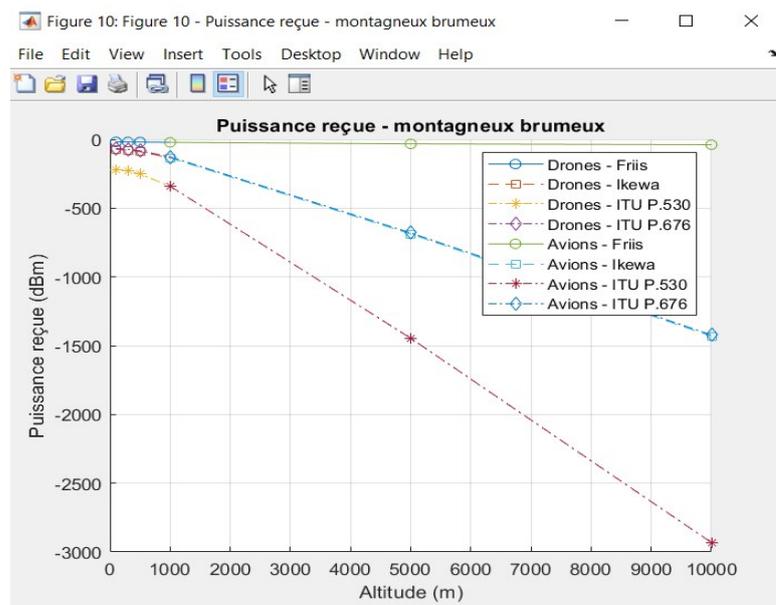


Figure 3. 10: Puissance reçue – montagneux brumeux.

La figure montre l'évolution de la puissance reçue (en dBm) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement montagneux et brumeux, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.11 : analyse de la figure 3.10

Modèle	Drones	Avions	Commentaires
Friis	~0 dBm, stable jusqu'à 9000 m (carrés bleus)	~0 dBm, stable jusqu'à 9000 m (losanges bleus)	Très optimiste, altitude et brume ont peu d'impact selon ce modèle
Ikewa	~0 dBm, stable jusqu'à 9000 m (cercles verts)	~0 dBm, stable jusqu'à 9000 m (cercles verts)	Optimiste, robuste face à la brume
ITU P.530	Chute rapide, proche de -500 dBm dès 2000 m (étoiles jaunes)	Chute extrême, environ -2500 dBm à 9000 m (étoiles rouges)	Très pessimiste, indique des pertes sévères dues à la brume et à l'altitude
ITU P.676	Idem ITU P.530 : chute rapide, proche de -500 dBm dès 2000 m (croix violettes)	Idem ITU P.530 : chute extrême, environ -3000 dBm à 9000 m (traits pointillés bleus)	Accentuation des pertes en raison des effets spécifiques modélisés (brume, humidité, etc.)

➤ La figure 3.11 présente l'évolution du rapport signal sur bruit (SNR, en dB) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un

environnement montagneux et brumeux, selon différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

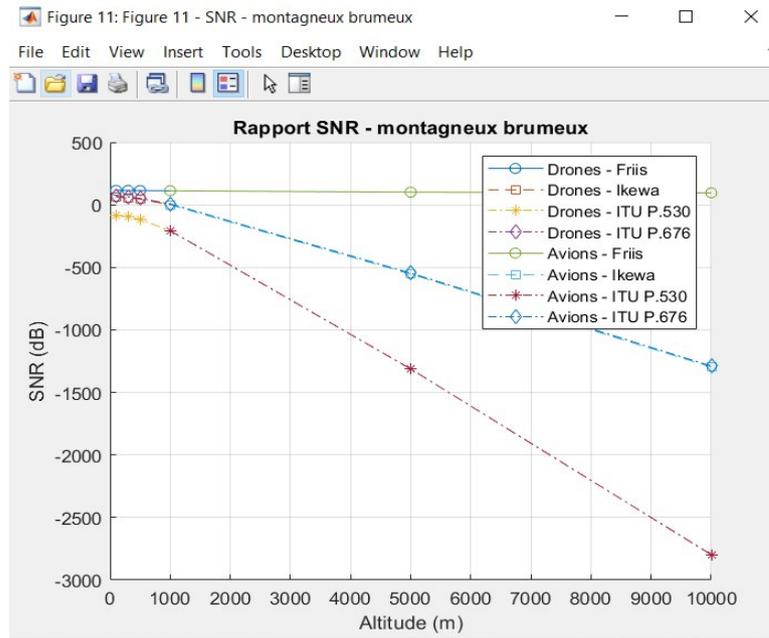


Figure 3. 11: Rapport SNR – montagneux brumeux.

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.12 : analyse de la figure 3.11

Modèle	Drones	Avions	Commentaires
Friis	Stable autour de 0 dB jusqu'à 10 000 m (cercles bleus)	Stable autour de 0 dB jusqu'à 10 000 m (cercles verts)	Très optimiste : altitude + brume ≠ impact notable
Ikewa	Stable autour de 0 dB jusqu'à 10 000 m (carrés jaunes)	Stable autour de 0 dB jusqu'à 10 000 m (cercles verts)	Optimiste, robuste face aux pertes dues à la brume
ITU P.530	Chute rapide dès basse altitude, environ -500 dB à 5 000 m (étoiles jaunes)	Chute dramatique, environ -2 500 dB à 10 000 m (étoiles rouges)	Très pessimiste : perte massive, communication quasi impossible à altitude élevée
ITU P.676	Idem ITU P.530 : chute forte, ~-500 dB à 5 000 m (losanges violets)	Idem ITU P.530 : chute extrême, ~-3 000 dB à 10 000 m (losanges bleus)	Accentue les pertes atmosphériques (brume, humidité, absorption spécifique)

- La figure 3.12 illustre l'évolution du débit (en bits/s) en fonction de l'altitude (en mètres) pour deux types de plateformes (drones et avions) dans un environnement montagneux et brumeux, en utilisant différents modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU P.530, ITU P.676).

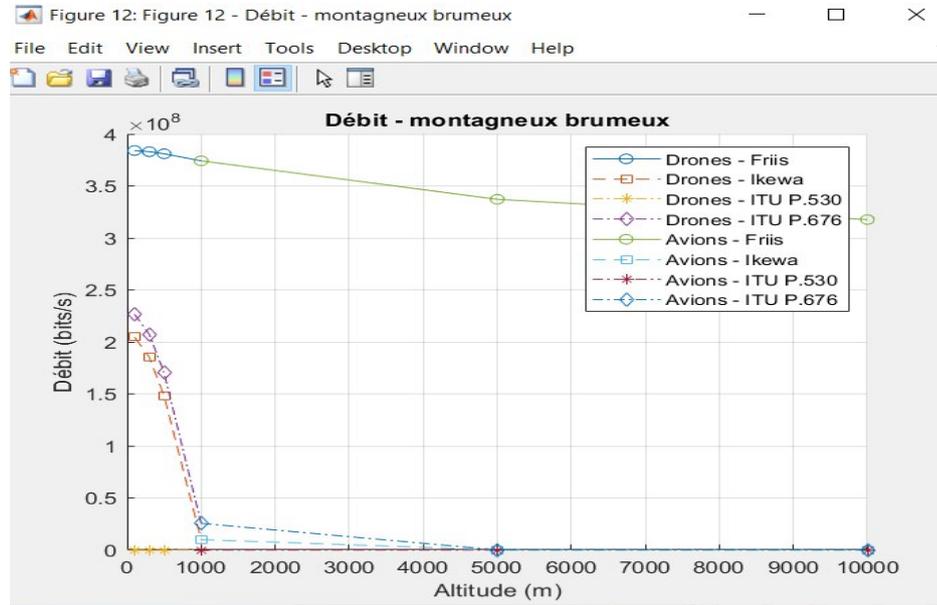


Figure 3. 12: Débit - montagneux brumeux.

➤ Analyse des courbes

Tableau 3.13 : analyse de la figure 3.12

Modèle	Drones	Avions	Commentaires
Friis	Débit initial élevé ($\sim 3,8 \times 10^8$ bits/s), légère baisse puis stabilisation autour de $3,3 \times 10^8$ bits/s, jusqu'à 10 000 m.	Idem drones : débit élevé, stabilisé, altitude \neq impact notable.	Très optimiste : n'intègre pas les pertes dues à la brume ou l'environnement complexe.
Ikewa	Débit similaire à Friis, stabilisation autour de $3,4 \times 10^8$ bits/s malgré l'altitude.	Idem drones : débit maintenu à des valeurs élevées ($\sim 3,4 \times 10^8$ bits/s) jusqu'à haute altitude.	Optimiste, mais légèrement plus réaliste que Friis (modèle semi-empirique).
ITU P.530	Chute brutale dès les basses altitudes, débit proche de zéro vers $\sim 1\ 000$ m.	Débit diminue progressivement, atteignant des valeurs très faibles à haute altitude ($\sim 10\ 000$ m).	Très pessimiste : prend en compte les pertes dues à la diffusion, absorption, brume, pluie, etc.

ITU P.676	Idem ITU P.530 : forte chute dès basse altitude, débit nul rapidement.	Chute progressive comme ITU P.530, mais parfois légèrement plus marquée selon la gamme fréquentielle.	Modèle conçu spécifiquement pour intégrer les pertes atmosphériques (vapeur d'eau, oxygène, etc.).
------------------	--	---	--

➤ La figure présente 3.13 un diagramme en barres représentant la moyenne des puissances reçues (en dBm) pour différents modèles de propagation : Friis, Ikewa, ITU P.530 et ITU P.676. Cette moyenne est calculée en considérant tous les cas (probablement différentes altitudes et plateformes, bien que ces informations ne soient pas directement visibles sur ce graphique).

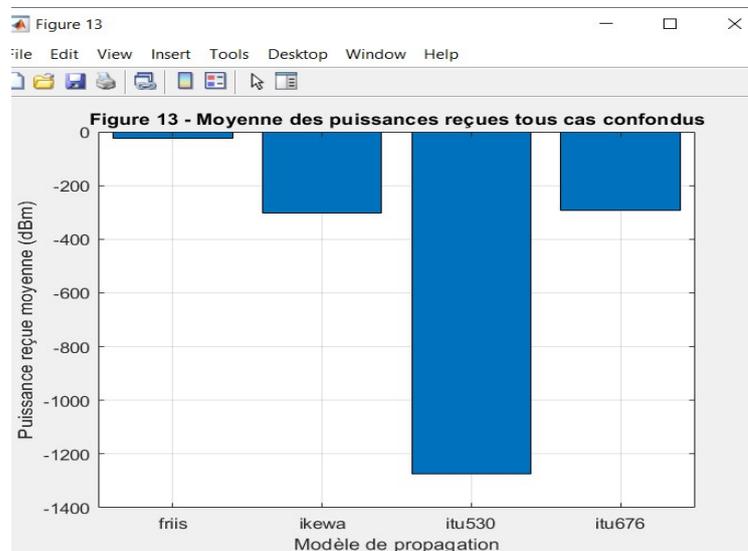


Figure 3. 13: Moyenne des puissances reçues tous cas confondus.

➤ Analyse des Barres

Tableau 3.14 : analyse de la figure 3.13

Modèle	Puissance reçue moyenne	Caractérisation	Commentaires
Friis	0 dBm	Le plus optimiste	Prédit la puissance reçue la plus élevée, faible atténuation.
Ikewa	≈ -300 dBm	Atténuation intermédiaire	Prédit une puissance reçue nettement plus faible que Friis.
ITU P.676	≈ -275 dBm	Atténuation intermédiaire	Proche d'Ikewa, légèrement plus optimiste.

ITU P.530	≈ -1275 dBm	Le plus pessimiste	Prédit la plus forte atténuation, perte de signal très importante.
--------------	---------------------	---------------------------	--

- La figure 3.14 présente un diagramme en barres illustrant le débit moyen (en bits/s) pour différents modèles de propagation : Friis, Ikewa, ITU P.530 et ITU P.676. Cette moyenne est calculée en considérant tous les environnements (ici, vraisemblablement l'environnement montagneux brumeux de la figure précédente et potentiellement d'autres non spécifiés), toutes les altitudes et les deux types de plateformes (drones et avions).

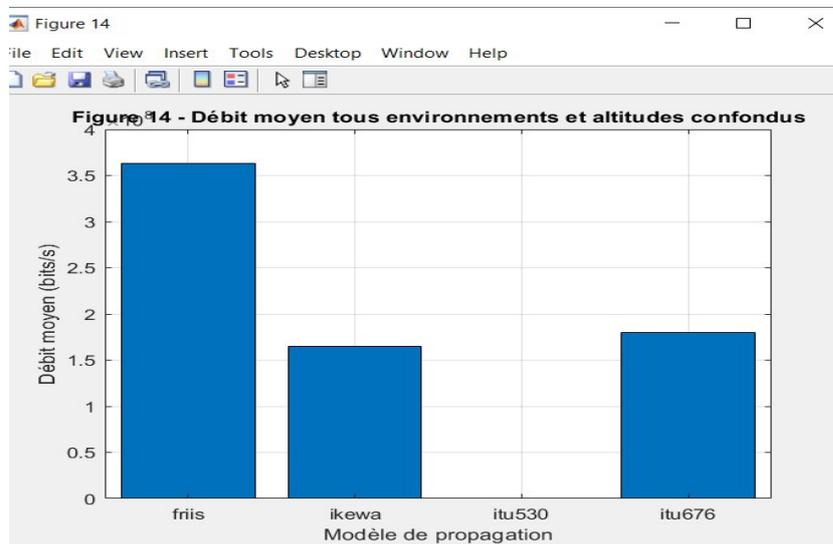


Figure 3. 14: Débit moyen tous environnements et altitudes confondus.

- **Analyse des barres**

Tableau 3.15 : analyse de la figure 3.14

Modèle	Débit moyen (bits/s)	Caractérisation	Commentaires
Friis	≈ 3.6 bits/s	Le plus optimiste	Prédit le débit le plus élevé, meilleure capacité de transmission.
Ikewa	≈ 1.65 bits/s	Débit intermédiaire	Nettement inférieur à Friis, mais bien meilleur qu'ITU P.530.
ITU P.676	≈ 1.8 bits/s	Débit intermédiaire	Légèrement supérieur à Ikewa, toujours inférieur à Friis.

ITU P.530	≈ 0 bits/s	Le plus pessimiste	Prédit une capacité de communication quasi nulle, forte dégradation.
--------------	------------	------------------------------	--

Tableau 3. 16 : Synthèse comparative des performances des modèles de propagation selon l’environnement et les paramètres de communication (puissance reçue, débit, SNR)

Environnement	Modèle	Puissance reçue	Débit	SNR
Suburbain pluvieux	Friis	Stable (≈0 dBm)	Haut ($3-4 \times 10^8$ bits/s)	Positif (>0 dB)
	Ikewa	Chute drastique (>5000m)	Nul (>4000m)	Négatif (>4000m)
	ITU P.530	Chute rapide	Nul (>2000m)	Négatif extrême
	ITU P.676	Décroissance modérée	Faible (>5000m)	Décroissance progressive
Rural neigeux	Friis	Stable (drones/avions)	Haut (avions)	Positif (avions)
	Ikewa	Faible (drones)	Nul (drones)	Négatif (drones)
	ITU P.530	Très faible (<-3000 dBm)	Nul (tous)	Très négatif (<-1000 dB)
	ITU P.676	Faible (>2000m)	Nul (drones)	Négatif (>2000m)
Urbain normal	Friis	Stable (≈0 dBm)	Haut (avions)	Positif (>0 dB)
	Ikewa	Stable (drones)	Faible (>2000m)	Positif (drones)
	ITU P.530	Chute brutale (avions)	Nul (avions >1000m)	Très négatif (avions)
	ITU P.676	Légère baisse (drones)	Nul (drones >1000m)	Faiblement négatif
Montagneux brumeux	Friis	Stable (≈0 dBm)	Élevé ($>3 \times 10^8$ bits/s)	Positif (>0 dB)
	Ikewa	Légère baisse	Moyen (>2000m)	Légèrement négatif
	ITU P.530	Chute extrême (>1000m)	Nul (>1000m)	Très négatif (<-500 dB)
	ITU P.676	Chute rapide (>2000m)	Faible (>2000m)	Négatif (>2000m)

D'après les résultats voici un tableau qui fait une comparaison entre le drone et l'Avion autonomes dans les quatre environnements :

Tableau 3. 17 : comparaison entre le drone et l'Avion autonomes dans les quatre environnements

Environnement	Drone	Avion autonome	Verdict
Urbain normal	Bon débit & SNR (Ikegami, Friis)	Fiable seulement avec Ikegami	Égalité (si Ikegami)
Montagneux brumeux	Seul Ikegami efficace < 500 m	Atténuation forte, même avec Ikegami	Drone mieux adapté
Rural neigeux	Bon < 900 m avec Ikegami & Friis	Très bon avec Ikegami jusqu'à 8500 m	Avion mieux adapté
Suburbain pluvieux	Performant < 800 m avec Ikegami	Chut rapide sauf ikegami	Drone légèrement mieux

3.9 Interface

➤ Description de l'interface

L'interface s'intitule « **Simulation 5G Drones et Avions** » et permet de configurer et de lancer des simulations de propagation radio 5G pour des communications entre une station de base et un drone ou un avion, dans différents environnements.

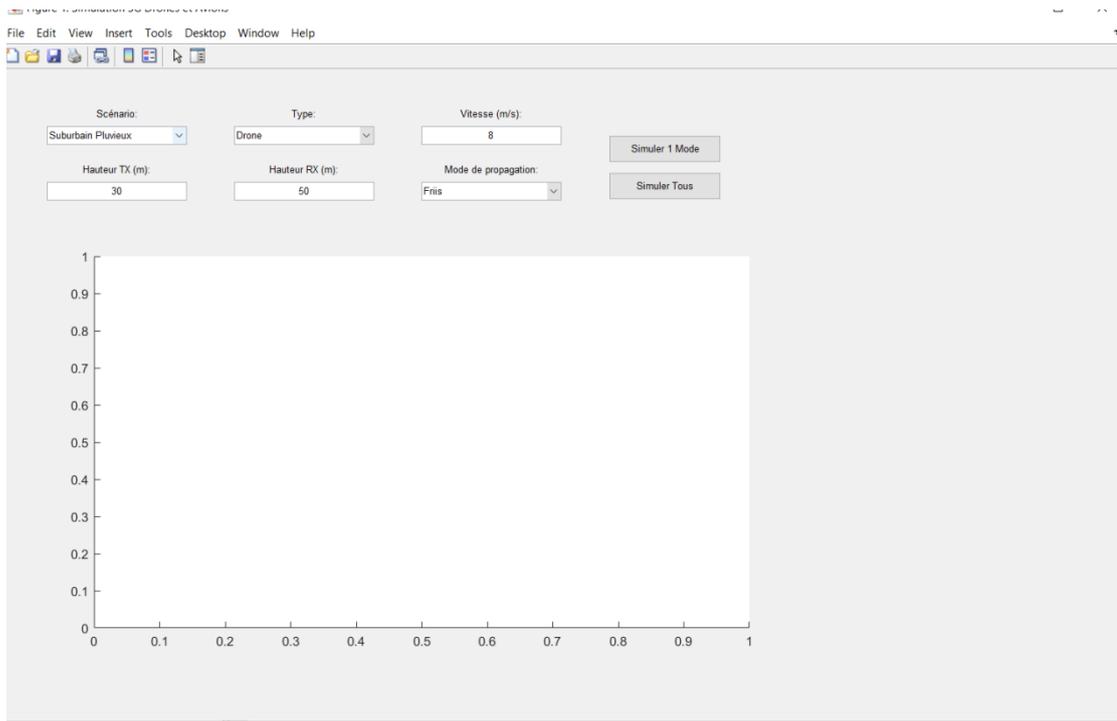
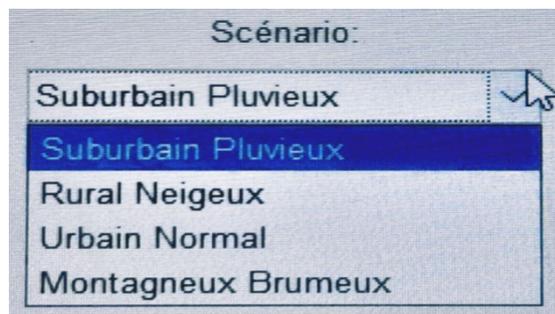


Figure 3. 15: Interface de simulation.

➤ **Éléments de l'interface utilisateur**

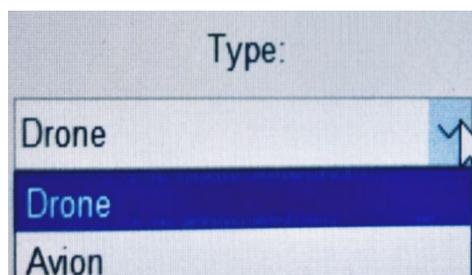
1) Scénario

Menu déroulant pour sélectionner l'environnement de propagation



2) Type

Menu déroulant pour choisir le type de plateforme : « Drone » ou « Avion ».



3) Vitesse (m/s)

Champ de saisie pour entrer la vitesse de déplacement du drone ou de l'avion

Vitesse (m/s):

4) Hauteur TX (m)

Champ de saisie pour la hauteur de l'émetteur (TX), typiquement la station de base

Hauteur TX (m):

5) Hauteur RX (m)

Champ de saisie pour la hauteur du récepteur (RX), typiquement le drone ou l'avion

Hauteur RX (m):

6) Mode de propagation

Menu déroulant pour choisir le modèle de propagation radio utilisé dans la simulation

Mode de propagation:

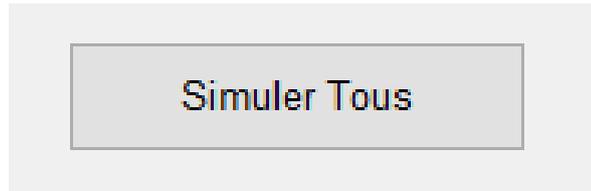
- Friis
- Friis**
- Ikewa
- ITU-R P.530
- ITU-R P.676
- Combiné

7) Boutons de simulation

Simuler 1 Mode : Lance la simulation pour le mode de propagation sélectionné.

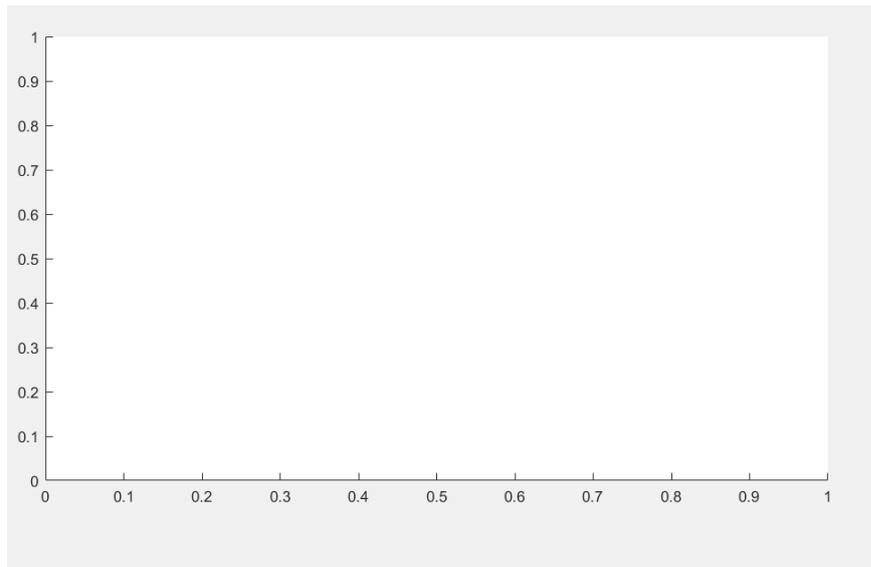
Simuler 1 Mode

Simuler Tous : Lance successivement les simulations pour tous les modèles de propagation disponibles.



8) Zone de graphique

Grand espace vide en bas de l’interface, destiné à afficher les résultats de la simulation sous forme de courbes (par exemple, pertes de propagation, SNR, débit, etc.).



➤ **Exemple de simulation d’interface**

On a pris le drone comme type dans l’environnement rural neigeux avec l’utilisation de ITU P-530 comme modèle de propagation

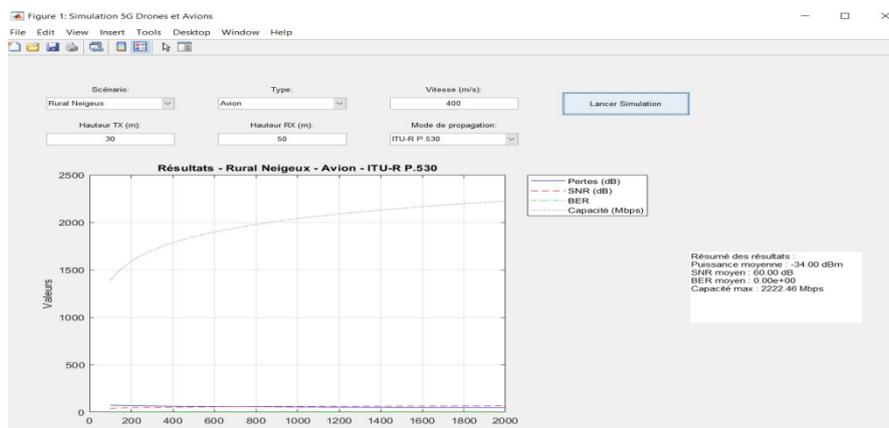


Figure 3.16 : exemple de simulation

3.10 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'influence déterminante de l'environnement et de l'altitude sur les performances des communications 5G dans le cadre des applications aériennes autonomes. À travers des simulations rigoureuses, menées sur quatre environnements types (suburbain pluvieux, rural neigeux, urbain dense et montagneux brumeux), il a été démontré que les conditions atmosphériques, la topographie et la hauteur de vol modifient significativement les métriques de performance, telles que la puissance reçue, le rapport signal sur bruit (SNR) et le débit.

L'analyse comparative des modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU-R P.530 et ITU-R P.676) a révélé des écarts notables dans l'évaluation des performances. Les modèles idéalisés comme Friis fournissent des résultats optimistes mais peu représentatifs des conditions réelles, tandis que les modèles ITU-R, plus complexes, permettent de mieux anticiper les dégradations liées aux pertes atmosphériques, aux effets multipath et aux environnements non-linéaires (NLOS). Le modèle Ikewa s'est quant à lui révélé adapté aux zones urbaines, avec des résultats intermédiaires entre réalisme et performance.

La simulation a également mis en évidence des différences marquées entre les drones (volant à basse altitude) et les avions autonomes (volant à haute altitude), soulignant l'importance de différencier les stratégies de communication selon le type de plateforme. Les drones, bien qu'ayant une portée plus limitée, bénéficient souvent d'une meilleure réception dans les environnements urbains ou suburbains à faible altitude. À l'inverse, les avions autonomes subissent une atténuation plus marquée à haute altitude, en particulier dans les milieux montagneux ou neigeux.

Enfin, le développement d'une interface interactive sous MATLAB constitue une avancée significative, permettant de configurer dynamiquement les scénarios et de visualiser les résultats en temps réel. Cet outil offre un support précieux pour l'évaluation, la conception et l'optimisation de systèmes de communication 5G embarqués dans des contextes variés.

En conclusion, cette étude confirme la nécessité de s'appuyer sur des modèles de propagation réalistes et contextualisés pour anticiper les performances des réseaux 5G en milieu aérien. Elle constitue une base solide pour de futures investigations, notamment en

intégrant des paramètres dynamiques (mobilité, doppler, interférences inter-cellulaires) et en explorant d'autres bandes de fréquences 5G telles que les millimétriques (mmWave

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a permis d'explorer en profondeur le potentiel de la technologie 5G dans le domaine aéronautique, en particulier dans le cadre des communications entre stations au sol et plateformes autonomes telles que les drones et les avions sans pilote. Il s'inscrit dans un contexte où la connectivité sans fil devient un levier stratégique pour le développement de l'aviation intelligente, à la croisée des enjeux technologiques, réglementaires et opérationnels.

Sur le plan réglementaire, l'étude a mis en évidence les défis liés à l'introduction de la 5G dans un espace aérien fortement dépendant de systèmes critiques comme les radioaltimètres. La nécessité d'une coordination étroite entre les autorités de régulation des télécommunications et les instances de l'aviation civile apparaît comme un prérequis pour garantir la sécurité des opérations. Le cas algérien, pris comme exemple, montre que les décisions nationales doivent s'appuyer sur des standards internationaux tout en tenant compte des réalités locales.

Sur le plan technique, un effort particulier a été consacré à la modélisation et à la simulation des performances radio 5G selon plusieurs modèles de propagation (Friis, Ikewa, ITU-R P.530 et P.676). Ces travaux ont démontré l'influence considérable de facteurs tels que l'altitude, les conditions météorologiques, le relief, ou encore le type de plateforme sur les métriques de performance : puissance reçue, rapport signal sur bruit (SNR), et débit. L'approche comparative a mis en évidence les limites des modèles théoriques idéalisés et l'importance d'utiliser des modèles réalistes pour concevoir des systèmes de communication robustes et adaptés aux différents environnements aériens.

L'implémentation d'une interface MATLAB interactive a constitué une autre contribution significative de ce mémoire. Elle permet de simuler, configurer et visualiser en temps réel les performances de la 5G selon des scénarios variés, facilitant ainsi l'évaluation des communications embarquées dans un cadre opérationnel.

Perspectives

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour prolonger ce travail :

- L'intégration de bandes de fréquences millimétriques (mmWave), spécifiques à la 5G avancée, afin d'évaluer leur comportement en milieu aérien.
- L'ajout de phénomènes dynamiques comme l'effet Doppler, les interférences inter-cellulaires ou la mobilité rapide des vecteurs.
- L'extension du simulateur vers un environnement 3D plus immersif, intégrant des couches de simulation de réseau et des paramètres de qualité de service (QoS).
- L'utilisation de techniques d'intelligence artificielle pour optimiser dynamiquement le choix des paramètres radio selon le contexte en vol.

En somme, ce mémoire jette les bases d'une démarche rigoureuse mêlant aspects réglementaires, modélisation physique et simulation numérique, pour accompagner le déploiement maîtrisé et efficace de la 5G dans le secteur aérien autonome. Il constitue une contribution utile à la recherche appliquée et ouvre la voie à des systèmes de communication plus intelligents, adaptatifs et sûrs dans un espace aérien en pleine mutation.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Mahmud, S. A. (2017). *5G Wireless Technologies – Future Generation Communication Technologies. International Journal of Computing and Digital Systems*, 6(3), 139–147.
- [2] Akbarzadeh, S., Schwoerer, J., Bailly, B., & Labidi, W. (2020). *Les réseaux 5G : architecture système, radio et cœur, coexistence 4G, mise en œuvre opérationnelle*.
- [3] Rappaport, T. S. (2015). *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2e édition, Prentice Hall.
- [4] Kachhavay, M. G., & Thakare, A. P. (2014). 5G Technology – Evolution and Revolution. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3(3), 1080–1087
- [5] Geetha, M., Rajya Lakshmi, K., & Mounika, P. (2020). 5G Technology. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 3(3), 52–56.
- [6] Intellect, M. R. (2025, April 30). Market Research Intellect | Revolutionizing business decisions and navigating market trends with expert research and intelligence. Market Research Intellect. <https://www.marketresearchintellect.com/>
- [7] TSA Media. (s. d.). *TSA* —. TSA. <https://www.tsa-algerie.com/>
- [8] Government of Canada, Service Canada, Citizen Service Branch, Integrated Channel Management, Web Strategies and Product Management. (s. d.). *Transport Canada*. <https://tc.canada.ca/>
- [9] GSMA. (2023, mai). 5G and Aviation Altimeters: Co-existence with IMT in 3.3–4.2 GHz and 4.8–4.99 GHz
- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2022). Safeguarding measures to protect radio altimeter from potential harmful interference (A41-WP/227 TE/78). Working paper presented by Saudi Arabia on behalf of the Arab Civil Aviation Organization (ACAO) States. Agenda Item 30: Aviation Safety and Air Navigation Policy, 2 August 2022

- [11] *Arpce.dz.* (s. d.). <https://www.arpce.dz/>
- [12] <https://anfr.dz>
- [13] *AGENCE NATIONALE DE L'AVIATION CIVILE.* (s. d.). <https://www.anac.dz/>
- [14] <https://www.anfr.fr/>
- [15] <https://www.bazl.admin.ch>
- [16] Robin ,J.-L.,Frick,S,&Kalyanaraman,S(2020, November 30). *Interference Risk to Radar Altimeters from Planned 5G Telecommunication Systems*RTCA Webinar. <https://www.fcc.gov/5G>
- [17] *Airport Technology | Airport news & views updated daily.* (2025, 30 avril). Airport Technology. <https://www.airport-technology.com/>
- [18] cnptic stratégie de cybersécurité
- [19] OMS & ICNIRP recommandations sur les CEM
- [20] OMS : Fiche d'information "Champs électromagnétiques et santé publique"
- [21] *IATA.* (s. d.). Home. <https://www.iata.org/>
- [22] *ENNA | Etablissement national de la navigation aérienne.* (s. d.). <https://www.enna.dz/>
- [23] **SESAR (2023).** "5G for Smart Mobility and Transport". Single European Sky ATM Research.
- [24] **EUROCONTROL (2021).** "5G and its impact on aviation".
- [25] **ITU (2021).** "Spectrum management for 5G and aviation". International Telecommunication Union.
- [26] **FAA (2022).** "5G and Aviation Safety". Federal Aviation Administration.
- [27] **GSMA (2022).** "5G and Aviation: Finding a Path Forward".

- [28] RTCA (2020). "Assessment of C-Band Mobile Telecommunications Interference Impact on Low Range Radar Altimeter
- [29] EASA (2021). "Cybersecurity in Aviation". European Union Aviation Safety Agency.
- [30] *Le blog high-tech & telecom de Xavier Studer.* (s. d.). Le Blog High-tech & Telecom de Xavier Studer. <https://www.xavierstuder.com/>
- [31] ARPCE Cahier des Charges 5G
- [32] Higham, 2006 : Historique des premiers drones
- [33] Centre d'études stratégiques aérospatiales, 2006 : Premier vol sans intervention humaine.
- [34] Jarry, 2010 : Utilisation des drones pendant la Seconde Guerre mondiale.
- [35] Newcome, 2004 : Développement des drones militaires dans les années 1950
- [36] OACI, 2011 : Organisation de l'Aviation Civile Internationale, référence pour la définition des UAV, UAS et RPAS
- [37] CAA, 2012 : Civil Aviation Authority du Royaume-Uni, pour les termes UA et SUA
- [38] U.S. Office of the Secretary of Defense, 2005 : Liste des acronymes liés aux drones
- [39] <https://www.uasolutions.ch/fr/types-de-drones/>
- [40] Austin, R. (2010). Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. Wiley..
- [41] <https://www.atim.com/en/ht-faq/new-faq-question-2/>
- [42] Radio Wave Propagation Modeling, Prediction and Assessment (L'Evaluation, la Prédiction et la Modélisation des Ondes Hertziennes)

- [43] Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36-42.
- [44] Rappaport, T. S. (2015). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hal
- [45] Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press
- [46] Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, M., Hassan, M., Giordano, L. G., Garcia-Rodriguez, A., & Yuan, J. (2019). "Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3417-3442.
- [47] <https://pressbooks.pub/wifispeed/chapter/attenuation-en-espace-libre/>
- [48] <https://semfionetworks.com/blog/free-space-path-loss-diagrams/>
- [49] Marceau Coupechoux, "Bilans de liaison : de la 2G à la 5G", IMT (2021)
- [50] <https://thesai.org/Publications/ViewPaper>
- [51] Riera, J. M., Pimienta-Del-Valle, D., Pérez-Peña, S., Garcia-Del-Pino, P., Benarroch, A., Calvo, A. I., & Blanco-Alegre, C. (2023). Characterization of Rain Attenuation in 80–200 GHz From Experimental Drop Size Distributions. *IEEE Transactions On antennas Ana propagation* 71(5), 4371-4379. <https://doi.org/10.1109/tap.2023.3259682>
- [52] Zarkadas, K., & Dimitrakopoulos, G. (2021). Rain Attenuation in 5G Wireless Broadband Backhaul Link and Develop (IoT) Rainfall Monitoring System. *International Journal Of Advanced Computer Science And Applications*
- [53] <https://itu-rpy.readthedocs.io/en/latest/apidoc/itu840.html>
- [54] RECOMMENDATION ITU-R P.840-8 - Attenuation due to clouds and fog
- [55] Khan, R., Kumar, P., Jayakody, D. N. K., & Liyanage, M. (2019). A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies : Potential Solutions, Recent Advancements,

- and Future Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 196-248.
<https://doi.org/10.1109/comst.2019.2933899>
- [56] ITU-R P.530-18 (2021), "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems"
- [57] ITU-R P.530-13 (2009), "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems"
- [58] Riera, J. M., Pimienta-Del-Valle, D., & Garcia-Del-Pino, P. (2022). Atmospheric propagation effects in the D-band with application to 5G-6G wireless communication systems. *2022 3rd URSI Atlantic And Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC)*, 1-4. <https://doi.org/10.23919/at-ap-rasc54737.2022.9814352>
- [59] ITU-R P.676-13 (2022) "Attenuation due to atmospheric gases"
- [60] ITU-R P.676-12 (2019) recommandation détaillée
- [61] Propagation des ondes radioélectriques à travers l'atmosphère
- [62] Rapport ANFR sur les phénomènes de propagation anormale : propagation par conduit et réflexion/réfraction sur les couches élevées de l'atmosphère Référence ANFR(15)
- [63] ICAO (2018). *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*, Doc 10019, Montréal
- [64] ITU-R M.1371-5 (2023). Technical characteristics of an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band (pour la gestion du spectre et la compatibilité).
- [65] 3GPP TR 38.901 (2022). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz.
- [66] Fotouhi, A., et al. (2019). "Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3417-3442.

- [67] The INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS & OIL: FROM THEORY TO APPLICATIONS March 05-06, 2013, Ouargla, Algeria
- [68] Clothier, R.A., Walker, R.A., Fulton, N.L., et al. (2015). "A Review of Autonomous Aircraft: Progress and Prospects." *Progress in Aerospace Sciences*.
- [69] Tang, L., Shao, G. (2015). "Drone remote sensing for forestry research and practices." *Journal of Forestry Research*.
- [70] Thippavong, D.P., Apaza, R.D., Barmore, B.E., et al. (2018). "Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations." *NASA Technical Reports*.
- [71] **UIT-R.** (2016). *Recommandation UIT-R P.525-3 : Calcul de l'affaiblissement en espace libre* (3e éd., novembre 2016). Union Internationale des Télécommunications. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-3-201611-F>