

## RAPPORT DE MINI-PROJET

Réalisée par :

*Siwar Trabelsi*

&

*Aziza Lahbib*

Sujet :

*Analyse des interférences dans la communication  
par satellites*

Soutenu le 14/5/2025 devant la commission de jury:

Mme Wiem Abderrahim

Encadrante

Mme Hiba Mzoughi

Rapporteuse



---

## **REMERCIEMENT**

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadrante, Madame Wiem Abderrahim, pour son engagement, sa rigueur et la qualité de son accompagnement tout au long de ce projet.

Ses orientations claires, ses remarques constructives et son encouragement permanent ont été d'une grande aide et ont fortement contribué à la bonne réalisation de ce travail. Nous avons beaucoup appris grâce à ses précieux conseils et à son encadrement attentif.

# ■ TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>vi</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte Général du Projet</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Motivations . . . . .	3
1.3 Objectif . . . . .	3
1.4 Veille Technologique . . . . .	4
1.5 Méthodologie Adoptée . . . . .	5
1.6 Conclusion . . . . .	5
<b>2 Etat de l'Art</b>	<b>6</b>
2.1 Introduction . . . . .	7
2.2 Chaine de communication satellitaire . . . . .	7
2.3 Bilan de liaison satellitaire . . . . .	8
2.4 Les types d'interférences . . . . .	8
2.4.1 Interférences inter-systèmes . . . . .	8
2.4.2 Interférences intra-systèmes . . . . .	10
2.5 Conclusion . . . . .	13
<b>3 Mise en oeuvre</b>	<b>14</b>
3.1 Introduction . . . . .	15
3.2 Environnement de Travail . . . . .	15
3.2.1 Environnement Matériel . . . . .	15
3.2.2 Environnement Logiciel . . . . .	15

## TABLE DES MATIÈRES

---

3.3	Modélisation et simulation des interférences . . . . .	16
3.3.1	Paramètres de simulation . . . . .	16
3.3.2	Scénarios de simulation . . . . .	17
3.4	Résultats . . . . .	21
3.5	Conclusion . . . . .	25
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>		<b>26</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>26</b>
<b>ANNEXES</b>		<b>28</b>
A.1	Bilan de liaison satellitaire . . . . .	28
A.1.1	Bilan de liaison satellite – Uplink (liaison montante) . . . . .	28
A.1.2	Bilan de liaison satellite – Downlink (liaison descendante) . . . . .	30

# **LISTE DES FIGURES**

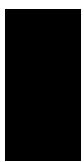
2.1	La chaine de communication satellitaire . . . . .	7
3.1	Scénario « interférence du satellite adjacent » . . . . .	17
3.2	Scénario «interférence de la station adjacente » . . . . .	18
3.3	Scénario « Interférence co-canal» . . . . .	19
3.4	Scénario « Interférence cross-polarisation» . . . . .	20
3.5	Rapport C/I en fonction de la distance entre les deux satellites principale et interférant . . . . .	21
3.6	Rapport C/I en fonction de l'EIRP de la station interférante . . . . .	22
3.7	Rapport C/I en fonction de l'angle . . . . .	23
3.8	Évolution du CPCI en fonction de $G_{main}$ . . . . .	24
3.9	Évolution du CPCI en fonction de $G_{cross}$ . . . . .	24



---

## **LISTE DES TABLEAUX**

1.1 Comparaison entre OneWeb et Starlink . . . . .	4
--	---



---

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

**ASI** Interférences Satellitaires Adjacentes

**CPCI** Cross-Polarization Channel Interference

**C/I** Rapport du Signal utile sur l'Interférence

**EIRP** Puissance Isotrope Rayonnée Effective

**TSI** Interférences des Systèmes Terrestres

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un monde de plus en plus interconnecté, la communication par satellite représente une technologie incontournable, notamment pour offrir une couverture globale, assurer des services dans les zones reculées, et soutenir les infrastructures critiques comme la navigation, la météorologie ou les systèmes de sécurité.

Malgré ses nombreux avantages, ce mode de communication est soumis à des défis techniques majeurs, parmi lesquels les interférences jouent un rôle déterminant. Ces interférences, qu'elles soient internes au système ou provoquées par des sources externes, peuvent fortement dégrader la qualité des transmissions, affectant ainsi la fiabilité et la performance des liaisons.

Dans le cadre de notre formation en ingénierie des communications et des réseaux, nous avons choisi de consacrer notre projet à l'analyse des interférences dans la communication par satellite, afin de mieux comprendre leur origine, leur impact sur la transmission, et les moyens techniques de les modéliser et les atténuer.

Ce rapport est divisé en trois chapitres ,le premier chapitre est consacré à la présentation du contexte global du projet. Il expose les motivations qui ont guidé notre choix de sujet, définit les objectifs poursuivis, et propose une veille technologique sur les technologies actuelles liées aux communications satellitaires. Nous y décrivons également la méthodologie adoptée pour conduire notre étude, en précisant les étapes théoriques et pratiques mises en œuvre.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les types d'interférences. Le troisième chapitre quant à lui, est dédié à la mise en œuvre technique de notre étude. Nous y présentons l'environnement de travail utilisé, avant de détailler les paramètres retenus pour la simulation. À travers des scénarios simulés sous *MATLAB*, nous analysons les résultats obtenus et mettons en évidence l'impact des interférences sur la performance du lien satellite.

---

# Contexte Général du Projet

## Sommaire

---

1.1	Introduction	3
1.2	Motivations	3
1.3	Objectif	3
1.4	Veille Technologique	4
1.5	Méthodologie Adoptée	5
1.6	Conclusion	5

---

### 1.1 Introduction

La communication satellitaire est essentielle pour assurer la connectivité mondiale, mais elle est souvent perturbée par des interférences qui affectent la qualité des transmissions. Dans ce chapitre, nous aborderons la motivation qui sous-tend notre projet, ainsi que les objectifs que nous cherchons à atteindre. Nous ferons également un état des lieux de la veille technologique et enfin, nous présenterons la méthodologie que nous avons adoptée pour mener à bien ce projet.

### 1.2 Motivations

Nous sommes motivés par la communication satellitaire qui est devenue indispensable. En effet, elle permet de relier des régions isolées, d'assurer des services essentiels comme la navigation ou la météo, et de maintenir des connexions même en l'absence d'infrastructures terrestres. Grâce à sa large couverture géographique, elle représente une solution fiable dans un monde toujours plus connecté.

Mais ces systèmes ne sont pas sans défis. L'un des problèmes majeurs reste celui des interférences. Qu'elles soient internes ou causées par des signaux extérieurs, elles peuvent dégrader la qualité des transmissions et nuire à la fiabilité des échanges. C'est ce constat qui a guidé notre projet : analyser l'origine de ces interférences, mesurer leur impact, et explorer les solutions pour les atténuer.

### 1.3 Objectif

L'objectif principal est d'étudier la communication par satellite. Ensuite, de comprendre les différentes interférences pouvant apparaître dans un tel système, analyser leur impact sur la transmission, et identifier les paramètres techniques qui influencent leur apparition.

Enfin, pour illustrer ces analyses de manière concrète, nous avons développé des codes MATLAB permettant de simuler des scénarios complets de communication satellitaire. Ce qui

nous a permis de visualiser l'effet des interférences sur la transmission et de mieux comprendre les facteurs qui influencent la performance d'un lien satellite.

### 1.4 Veille Technologique

Le paysage des communications par satellite évolue rapidement avec l'arrivée des mégaconsstellations comme Starlink (SpaceX), OneWeb, ou encore Eutelsat OneWeb.

Ces projets ambitieux lancent des milliers de satellites en orbite basse (LEO) pour offrir une connexion Internet haut débit partout dans le monde, même dans les zones les plus isolées. Le principal avantage de ces constellations est leur faible latence grâce à leur altitude réduite, ainsi qu'une meilleure couverture grâce au grand nombre de satellites.

Ces systèmes offrent également une meilleure résilience réseau, une réduction des coûts d'accès à Internet, et une réactivité accrue pour les services d'urgence et les environnements mobiles [1].

**TABLE 1.1 – Comparaison entre OneWeb et Starlink**

	<b>OneWeb</b>	<b>Starlink</b>
<b>Opérateur</b>	Eutelsat OneWeb	SpaceX (États-Unis)
<b>Nombre de satellites</b>	Environ 648 satellites en orbite basse (LEO)	Plus de 7 000 satellites en orbite basse (LEO)
<b>Altitude orbitale</b>	Environ 1 200 km	Environ 550 km
<b>Public cible</b>	Entreprises, gouvernements, opérateurs télécoms	Grand public, zones rurales, entreprises, gouvernements
<b>Couverture géographique</b>	Couvre principalement l'hémisphère nord	Disponible dans plus de 125 pays et territoires
<b>Fiabilité</b>	Fiable dans les zones rurales mais avec interruptions lors des pics d'utilisation	Très stable et constant, même dans les zones reculées
<b>Débit descendant typique</b>	25 à 220 Mbps	Jusqu'à 195 Mbps
<b>Débit montant typique</b>	5 à 20 Mbps	Jusqu'à 32 Mbps
<b>Latence</b>	40–50 ms en pratique	20–40 ms annoncée (meilleure que OneWeb)

Dans cette étude, nous nous appuierons sur les paramètres réels de ces constellations pour analyser et mieux comprendre l'impact des interférences dans ce nouveau contexte.

### 1.5 Méthodologie Adoptée

Pour atteindre les objectifs de ce projet, nous avons suivi une méthodologie structurée en plusieurs étapes :

1. **Étude théorique** : Recherche documentaire approfondie sur les systèmes de communication satellitaire pour comprendre leur fonctionnement général.
2. **Identification des types d'interférences** : Classification des interférences (intra-système, inter-système, etc.), étude de leur origine et de leur impact.
3. **Analyse des paramètres influents** : Étude des paramètres techniques comme le rapport C/I (porteuse sur interférence) qui influencent la qualité de la transmission.
4. **Modélisation et simulation sous MATLAB** : Développement de scénarios simulés dans MATLAB pour observer l'impact des interférences sur un lien satellite.
5. **Interprétation des résultats** : Analyse des résultats obtenus pour en tirer des conclusions sur le comportement des interférences.

### 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les bases de notre projet en définissant les objectifs et le contexte technologique. Dans le chapitre suivant, nous approfondirons les aspects techniques en explorant les résultats obtenus à travers notre approche méthodologique.

Chapitre

**2**

---

## **Etat de l'Art**

### **Sommaire**

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Chaine de communication satellitaire</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>Bilan de liaison satellitaire</b>	<b>8</b>
<b>2.4</b>	<b>Les types d'interférences</b>	<b>8</b>
2.4.1	Interférences inter-systèmes	8
2.4.2	Interférences intra-systèmes	10
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>

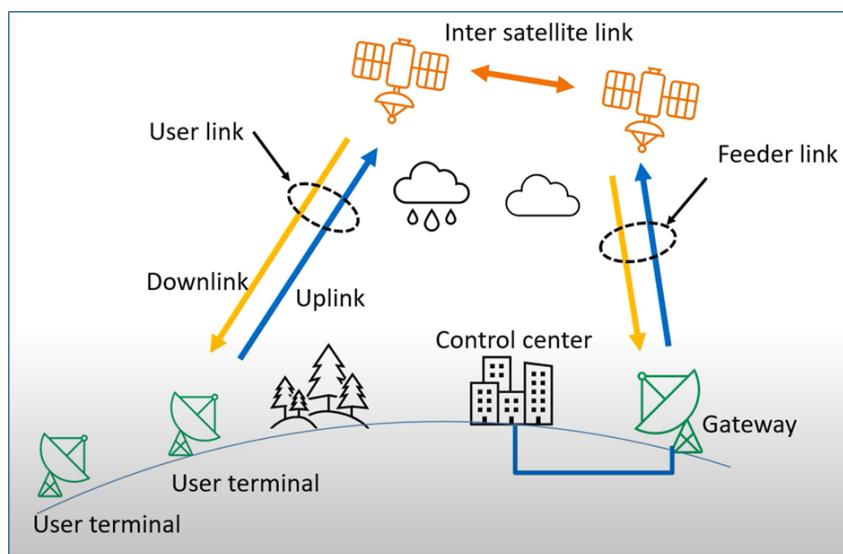
---

## 2.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la chaîne de communication satellitaire, en détaillant ses composantes fondamentales. Il aborde ensuite le bilan de liaison, ainsi que les différentes formes d'interférences susceptibles d'affecter la qualité du signal.

## 2.2 Chaine de communication satellitaire

La communication satellitaire s'appuie sur un système complexe composé de plusieurs éléments interdépendants. Elle débute avec le lien utilisateur (User link), qui permet l'échange de données entre les terminaux au sol (comme les antennes paraboliques ou les smartphones) et le satellite, via une liaison montante (Uplink) pour l'envoi des données et descendante (Downlink) pour leur réception. Ces données sont ensuite transmises à une passerelle (Gateway) par le lien feeder, assurant ainsi la connexion avec les réseaux terrestres. Parallèlement, les satellites peuvent communiquer directement entre eux grâce aux liens intersatellites (Inter satellite link), ce qui améliore l'efficacité du réseau et réduit les temps de latence. L'ensemble de cette chaîne garantit une connectivité performante, y compris dans les régions les plus isolées [2].



**FIGURE 2.1 – La chaîne de communication satellitaire**

## 2.3 Bilan de liaison satellitaire

Le bilan de liaison link budget permet d'évaluer la qualité d'un lien de communication entre une station terrestre et un satellite, en intégrant l'ensemble des gains et pertes subis par le signal. On distingue deux cas fondamentaux :

- **Bilan de liaison en Uplink (liaison montante)** : de la Terre vers le satellite.
- **Bilan de liaison en Downlink (liaison descendante)** : du satellite vers la Terre.

Chacune de ces liaisons est analysée à l'aide de plusieurs paramètres : puissance d'émission, gain d'antenne, pertes de transmission, figure de mérite ( $G/T$ ), pertes dues à l'alignement, température équivalente de bruit, etc. [voir annexe]

## 2.4 Les types d'interférences

Les interférences sont des signaux indésirables qui perturbent les transmissions radiofréquences des satellites. Elles peuvent provenir d'un même réseau satellite ou d'un réseau satellite voisin.

On distingue deux types principaux :

- Les interférences **intra-système**, provenant du même système
- Les interférences **inter-systèmes**, causées par d'autres réseaux ou équipements

### 2.4.1 Interférences inter-systèmes

#### 2.3.1.1 Adjacent Satellite Interference (ASI)

L'ASI est une interférence causée par des satellites voisins en orbite géostationnaire (GEO) qui émettent sur des fréquences proches. Elle survient notamment dans les cas suivants :

**Cas 1 : Espacement réduit des satellites en orbite** : si les satellites sont placés très proches (souvent à  $2^\circ$  ou moins), augmentant les risques de brouillage mutuel.

**Cas 2 : Chevauchement des faisceaux d'antennes** : les faisceaux émis peuvent se superposer, entraînant une réception non désirée par les utilisateurs ciblés par un autre satellite.

**Cas 3 : Mauvaise isolation des antennes ou émission excessive :** une antenne au sol mal dirigée ou un satellite émettant trop puissamment peut provoquer une captation non souhaitée du signal d'un satellite adjacent.

Le rapport C/I est défini comme la puissance du signal utile sur la puissance de l'interférence, exprimé en décibels (dB). Il est donné par :

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{ASI} = \frac{EIRP \cdot L \cdot G_{Rx}}{EIRP_{ASI} \cdot L_{ASI} \cdot G_{Rx\_ASI}} \quad (2.1)$$

Où :

- $EIRP$  : Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente
- $L$  : Pertes de propagation
- $G_{Rx}$  : Gain de l'antenne de réception
- $G_{Rx\_ASI}$  : Gain de l'antenne pour l'interférence ASI
- $L_{ASI}$  : Pertes de propagation pour l'interférence ASI
- $EIRP_{ASI}$  : EIRP de l'interférence ASI

[4]

### 2.3.1.2 Terrestrial Station Interference (TSI)

La TSI est une interférence causée par des stations terrestres émettant dans des bandes de fréquences similaires à celles des satellites. Elle survient notamment dans les cas suivants :

**Cas 1 : Proximité géographique des stations terrestres :** plusieurs stations installées à courte distance sans coordination adéquate.

**Cas 2 : Utilisation de fréquences partagées ou non coordonnées :** exploitation de bandes de fréquences sans coordination réglementaire.

**Cas 3 : Équipements défectueux ou mal configurés :** station mal entretenue avec amplificateur trop puissant ou antenne mal orientée [3].

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{TSI} = \frac{EIRP \cdot L \cdot G_{Rx}}{EIRP_{TSI} \cdot L_{TSI} \cdot G_{Rx\_TSI}} \quad (2.2)$$

## 2.4.2 Interférences intra-systèmes

### 2.3.2.1 Interférence co-canal

L'interférence co-canal en communication par satellite se produit lorsque plusieurs liaisons utilisent la même fréquence et interfèrent les unes avec les autres, compromettant ainsi la qualité du signal et la fiabilité de la communication où les ressources spectrales sont limitées et doivent être partagées efficacement entre différents utilisateurs et systèmes. Les faisceaux d'un même satellite se chevauchent et utilisent la même fréquence, ce qui peut provoquer des interférences entre les différentes liaisons en raison du recouvrement spatial des zones couvertes par ces faisceaux. Cela devient d'autant plus problématique lorsque le satellite est utilisé pour desservir plusieurs utilisateurs simultanément dans une même bande de fréquence, entraînant une interférence mutuelle et une dégradation des performances.

Pour calculer le rapport C/I de l'interférence co-canal, on suit les étapes de calcul suivantes :

#### a. Downlink(DL) – Antenne Satellite (UIT-R S.672-4)

##### Paramètres géométriques

- $\theta$  : Angle hors axe entre l'antenne satellite et la direction idéale du faisceau (où l'antenne terrestre est parfaitement alignée avec l'antenne satellite)
- $\theta_{3dB}$  (en degrés) : Angle pour lequel le gain chute de 3 dB :

$$\theta_{3dB} = 70 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad [\text{degrés}] \quad (1)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde (m) et  $D$  le diamètre de l'antenne satellite (m).

- $\theta_{\max}$  : Angle de transition entre le lobe principal et les lobes secondaires :

$$\theta_{\max} = \theta_{3dB} \cdot \sqrt{\ln 2} \approx 0,83 \cdot \theta_{3dB} \quad (2)$$

##### Gain d'antenne

$$G_{\text{sat}}(\theta) = \begin{cases} G_{\max} - 3 \cdot \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2 & \text{si } \theta \leq \theta_{\max} \\ G_{\max} - 25 - 30 \log_{10} \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right) & \text{si } \theta > \theta_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

### Puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP)

$$EIRP_{\text{DL}} = P_{\text{tx,sat}} + G_{\text{sat}}(\theta) - L_{\text{tx,sat}} \quad (4)$$

### Rapport C/I

$$\left( \frac{C}{I} \right)_{\text{DL}} = EIRP_{\text{DL,desire}} - EIRP_{\text{DL,interf}} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

### b. Liaison montante (UL) – Antenne Terrestre (UIT-R S.465-6)

#### Paramètres géométriques

- $\theta$  : Angle hors axe entre l'antenne terrestre et la direction idéale du faisceau (où l'antenne satellite est parfaitement alignée avec l'antenne terrestre)
- $\theta_{3dB}$  :

$$\theta_{3dB} = 70 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad [\text{degrés}] \quad (6)$$

- $\theta_{\max}$  :

$$\theta_{\max} = 20 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

### Gain d'antenne

$$G_{\text{ground}}(\theta) = \begin{cases} G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} \cdot \left( \frac{D}{\lambda} \cdot \theta \right)^2 & \text{si } \theta \leq \theta_{\max} \\ G_{\max} - 25 - 30 \log_{10} \left( \frac{\theta}{\theta_{\max}} \right) & \text{si } \theta > \theta_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

### Puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP)

$$EIRP_{\text{UL}} = P_{\text{tx,ground}} + G_{\text{ground}}(\theta) - L_{\text{tx,ground}} \quad (9)$$

**Rapport C/I**

$$\left( \frac{C}{I} \right)_{\text{UL}} = EIRP_{\text{UL,desire}} - EIRP_{\text{UL,interf}} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

[4]

**2.3.2.2 Cross-Polarization Channel Interference (CPCI)**

La CPCI est une interférence causée par le couplage entre polarisations orthogonales dans un même canal fréquentiel. Elle survient notamment dans les cas suivants :

**Cas 1** : Imperfection des antennes : aucune antenne ne peut générer ou recevoir une polarisation parfaitement pure, entraînant une fuite de signal vers la polarisation opposée.

**Cas 2** : Conditions atmosphériques adverses : la pluie et les particules de glace provoquent une dépolarisation des ondes, convertissant une partie du signal utile en interférence.

**Cas 3** : Réutilisation agressive des fréquences : dans les systèmes à double polarisation, le même canal fréquentiel est utilisé simultanément en polarisations orthogonales, augmentant les risques de couplage.

Le rapport signal sur interférence est donné par :

$$\left( \frac{C}{I} \right)_{\text{CPCI}} = \frac{EIRP_{co}}{\sum_{j \neq i} EIRP_{cx_j}} \quad (2.3)$$

Où :

- $EIRP_{co}$  : Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente du signal utile
- $EIRP_{cx_j}$  : Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente des signaux interférents en polarisation croisée
- $i$  : Indice du faisceau/fréquence utile
- $j$  : Indice des faisceaux/fréquences interférents

Le niveau d’interférence CPCI est fortement influencé par la discrimination de polarisation croisée (XPD), qui mesure la capacité d’une antenne à isoler les deux polarisations. Elle est définie comme le rapport entre le gain d’antenne dans la polarisation co-polaire et celui dans la polarisation croisée. Un XPD élevé (typiquement  $\geq 30$  dB) est recherché pour limiter la CPCI et garantir une bonne isolation entre polarisations [4].

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la chaîne de communication satellitaire, le bilan de liaison ainsi que les différents d’interférences qui peuvent altérer la qualité des signaux. Dans le chapitre suivant, nous passerons à la mise en œuvre pratique à travers des simulations sur MATLAB afin d’analyser l’impact réel de ces interférences sur les communications satellitaires.

---

## Mise en oeuvre

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Environnement de Travail</b>	<b>15</b>
3.2.1	Environnement Matériel	15
3.2.2	Environnement Logiciel	15
<b>3.3</b>	<b>Modélisation et simulation des interférences</b>	<b>16</b>
3.3.1	Paramètres de simulation	16
3.3.2	Scénarios de simulation	17
<b>3.4</b>	<b>Résultats</b>	<b>21</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>25</b>

---

## 3.1 Introduction

Après avoir posé les bases théoriques dans les chapitres précédents, Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique de notre étude à travers la modélisation et la simulation sous Matlab de scénarios d’interférences, afin d’analyser leur impact sur la qualité des signaux satellitaires.

## 3.2 Environnement de Travail

### 3.2.1 Environnement Matériel

La mise en œuvre des simulations a été réalisée à l'aide de deux ordinateurs personnels. Le premier est un ordinateur HP équipé d'un processeur Intel Core i5 et d'une carte graphique Nvidia, tandis que le second est un Lenovo doté d'un processeur Intel Core i5 et d'une carte graphique Nvidia GeForce RTX. Ces configurations matérielles ont offert des performances suffisantes pour exécuter efficacement les simulations, notamment pour le traitement des scénarios complexes d’interférences et la visualisation des résultats.

### 3.2.2 Environnement Logiciel

Le logiciel utilisé pour la mise en œuvre des simulations est MATLAB, reconnu pour ses performances en calcul scientifique, en traitement du signal et en modélisation de systèmes complexes. Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé Aerospace Toolbox, une boîte à outils spécialisée de MATLAB qui fournit des fonctions pour la modélisation des systèmes spatiaux, la gestion des coordonnées géospatiales et la visualisation des trajectoires de satellites. Cette toolbox nous a permis de représenter de manière réaliste les positions des satellites, de simuler

leurs mouvements et d'introduire des scénarios d’interférences en tenant compte de paramètres orbitaux précis. Grâce à cet environnement, nous avons pu concevoir et analyser les effets des interférences sur les communications par satellite avec un haut niveau de précision.

## 3.3 Modélisation et simulation des interférences

### 3.3.1 Paramètres de simulation

La simulation débute le **1er mai 2025 à 11h40**.

- startTime = datetime(2020, 5, 1, 11, 40, 0) : date et heure de début de la simulation.
- stopTime = startTime + minutes(20) : durée totale de la simulation (20 minutes).
- sampleTime = 60 : intervalle d'échantillonnage fixé à 60 secondes.

### Paramètres orbitaux des satellites

Deux satellites sont utilisés dans cette simulation avec les caractéristiques suivantes :

#### Satellite 2 (orbite basse, ~7000 km)

- semiMajorAxis = 7 000 000 m : semi-grand axe.
- eccentricity = 0.001 : faible excentricité, orbite quasi circulaire.
- inclination = 0 : orbite équatoriale.
- trueAnomaly = 0 : anomalie vraie initiale.

#### Satellite 1 (orbite géostationnaire, ~36 000 km)

- semiMajorAxis = 36 000 000 m : semi-grand axe.
- eccentricity = 0.001 : même faible excentricité.
- inclination = 0 : orbite équatoriale.
- trueAnomaly = 10 : anomalie vraie initiale.

### Paramètres de communication RF

Les communications entre les satellites utilisent les caractéristiques suivantes :

- fréquence = 14e9 Hz : fréquence de communication de 14 GHz (bande Ku).
- lambda = 0.031 m : longueur d'onde correspondante, avec  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

### 3.3.2 Scénarios de simulation

#### a. Scénario « interférence du satellite adjacent »

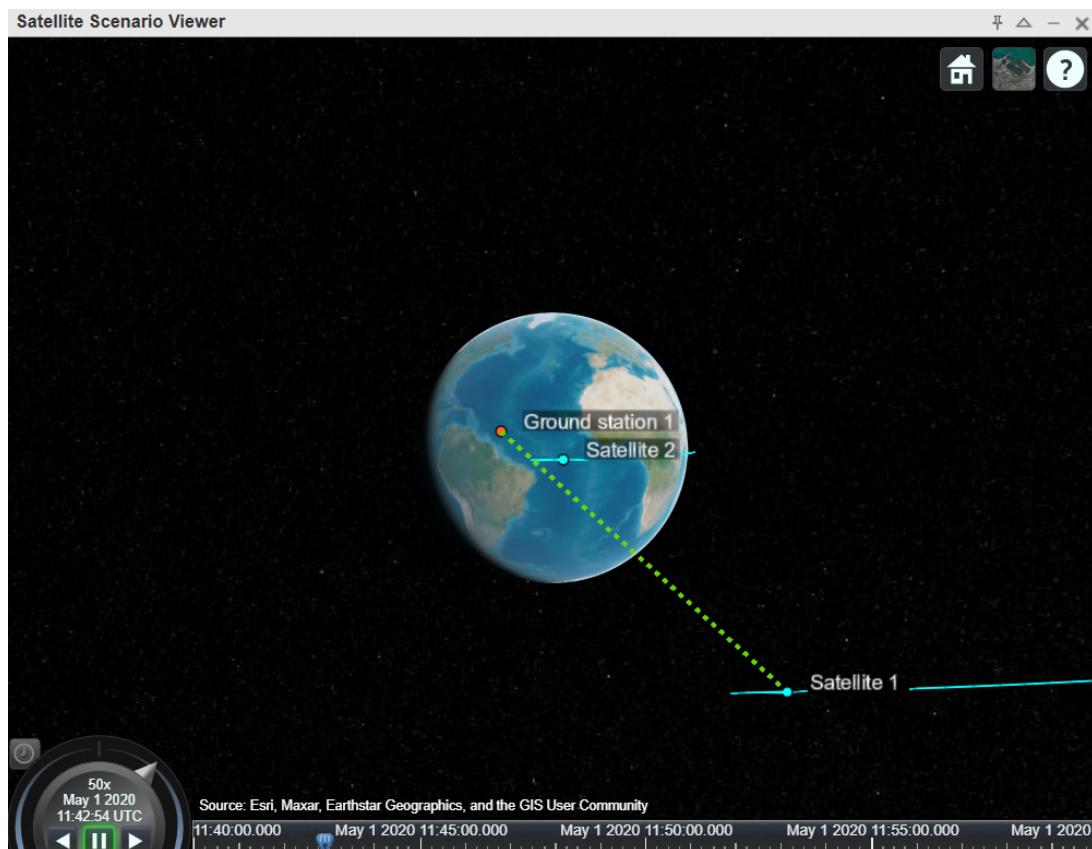


FIGURE 3.1 – Scénario « interférence du satellite adjacent »

Dans ce scénario, nous analysons le niveau d’interférence causé par un satellite adjacent (Satellite2) sur la liaison principale entre une station au sol (Station1) et un satellite principal (Satellite1).

Le Satellite1 est considéré comme le satellite utile, tandis que Satellite2 (interférent) est également dirigé vers la même station au sol.

L’interférence est évaluée en calculant le rapport  $\frac{C}{I}$  à chaque instant du scénario. Ce rapport est influencé par :

les pertes en espace libre, la puissance émise, et le gain de l’antenne de réception.

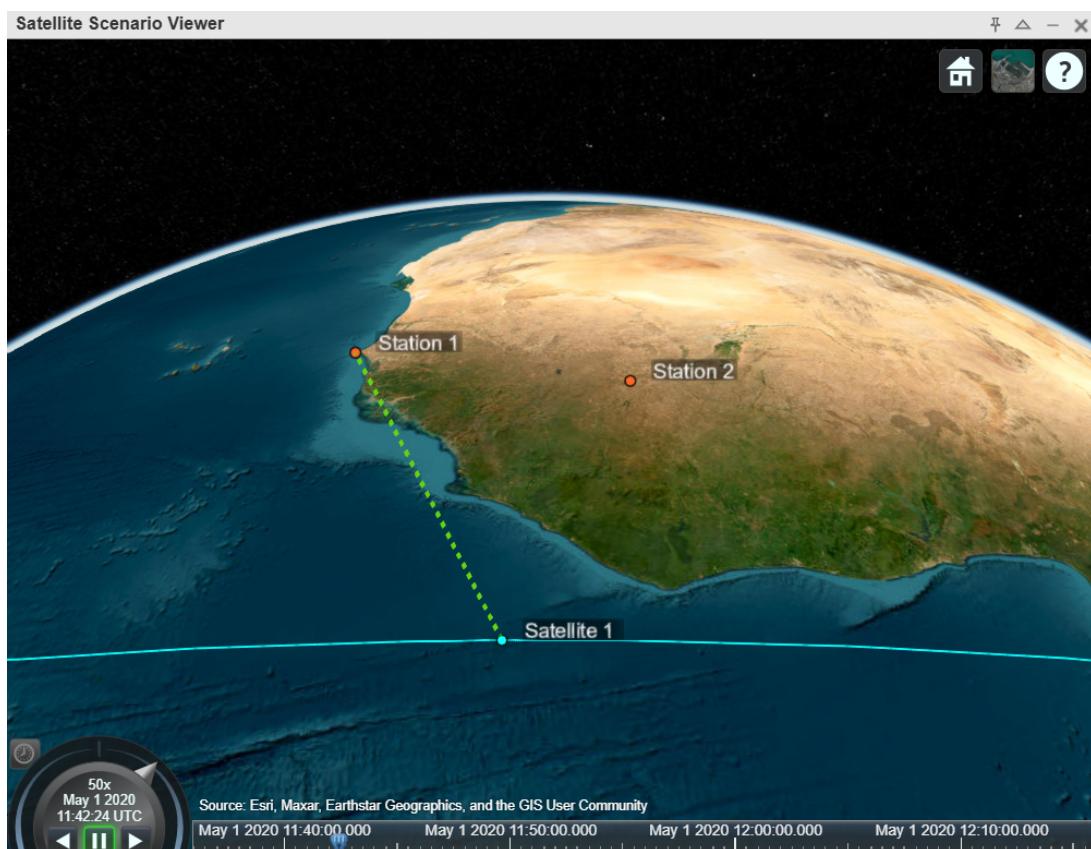
Le but est de modéliser l’effet d’un satellite non désiré émettant dans la même direction que le satellite désiré, et d’observer comment la distance relative entre les deux satellites affecte ce

rappor  $C/I$ .

Cette simulation met en évidence les conditions dans lesquelles un satellite voisin peut causer des perturbations significatives, notamment lorsque :

leur séparation angulaire est faible, ou que leurs liaisons convergent vers une même zone de couverture.

### b. Scénario « interférence de la station adjacente »



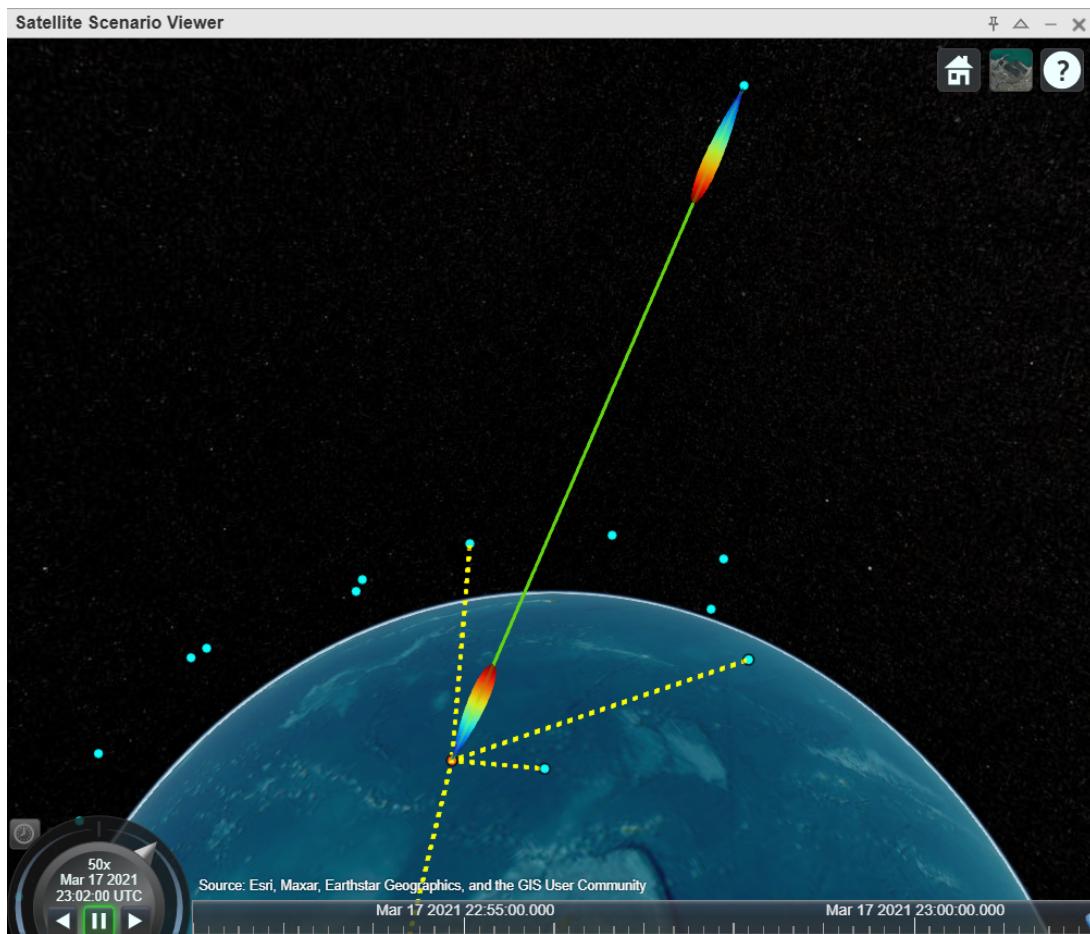
**FIGURE 3.2 – Scénario «interférence de la station adjacente »**

Dans ce scénario, une station terrestre principale (Station1) communique avec un satellite (Satellite1). Une seconde station terrestre (Station2), située dans une zone géographiquement éloignée mais significative en termes de propagation, agit comme source d’interférence potentielle. L’objectif est d’évaluer l’impact de cette interférence sur la qualité du lien entre la station principale et le satellite.

L’interférence est modélisée par la variation de la puissance émise de la station perturbatrice (Station2). À chaque instant simulé, le rapport  $C/I$  (signal utile sur interférence) est calculé

pour observer la dégradation du signal reçu à Station1 en fonction de différentes valeurs de puissance émise.

### c. Scénario « interférence co-canal »



**FIGURE 3.3 – Scénario « Interférence co-canal»**

Ce scénario vise à étudier l'impact de l'interférence co-canal entre une antenne terrestre et une antenne satellitaire.

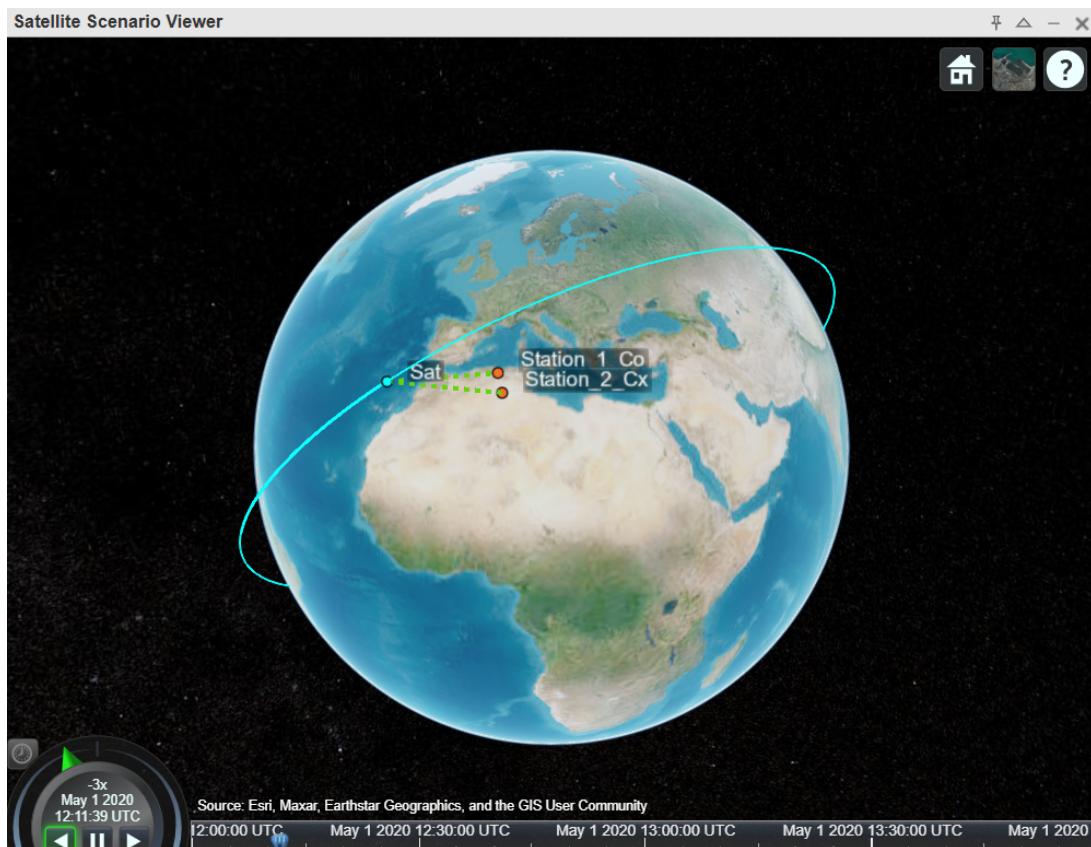
L'interférence se produit lorsque des stations terrestres voisines et des satellites voisins opérant sur la même bande de fréquence, perturbe la communication entre le satellite et la station principale.

Le gain des antennes (satellite et station terrestre) varie en fonction de l'angle de radiation. Pour chaque angle :

la puissance reçue par les antennes est calculée, en tenant compte des pertes de transmission.

Le rapport  $C/I$  est ensuite déterminé pour chaque angle, permettant d'analyser l'impact de cette interférence co-canal sur la qualité de la communication.

### d. Scénario « interférence cross-polarisation (CPCI) »



**FIGURE 3.4 – Scénario « Interférence cross-polarisation»**

Dans ce scénario, nous étudions les interférences dues à la polarisation croisée (CPCI) sur les communications downlink (du satellite vers la Terre). Un satellite en orbite basse (LEO) envoie simultanément deux signaux à deux stations terrestres différentes.

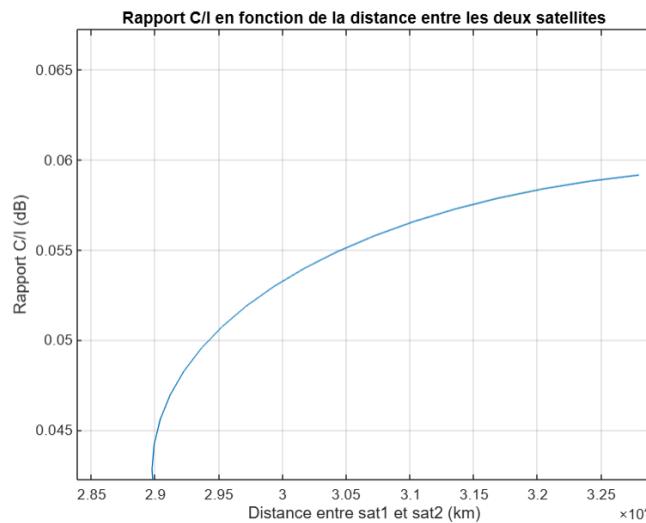
Trois entités sont impliquées dans ce scénario :

- **Station 1 (Station-1-Co)** : Station principale recevant le signal utile du satellite, polarisé selon la direction co-polaire (polarisation principale).
- **Station 2 (Station-2-Cx)** : Station interférente, qui reçoit un signal polarisé de manière croisée par rapport à la station principale.

Le satellite émet deux signaux orthogonaux (co-polaire et croisé) vers ces deux stations. En raison de la différence de polarisation, la station principale reçoit à la fois le signal utile et des interférences dues à la station interférente , créant ainsi des interférences de polarisation croisée (CPCI).

## 3.4 Résultats

### 3.4.1 Interférence du satellite adjacent



**FIGURE 3.5 – Rapport C/I en fonction de la distance entre les deux satellites principale et interférant**

La figure 3.5 montre que plus la distance entre les deux satellites augmente, plus le rapport C/I augmente.

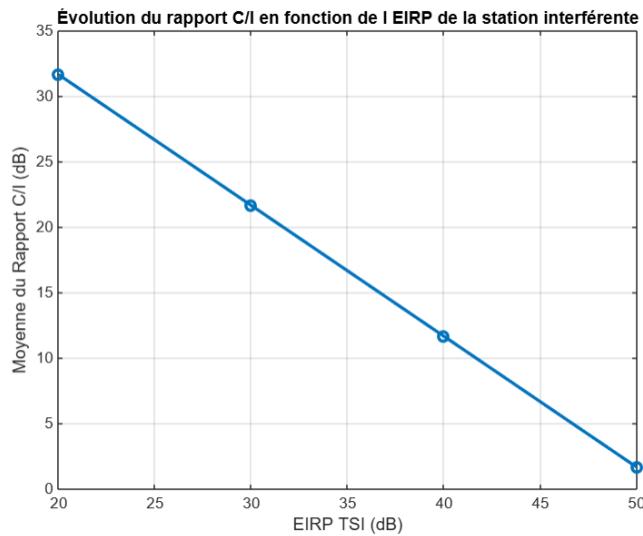
À mesure que le satellite interférent s'éloigne du satellite principal, l'intensité de l'interférence diminue à la station terrestre (du fait de l'augmentation des pertes en espace libre), ce qui améliore la qualité du signal utile.

Ainsi, la qualité de réception s'améliore avec la séparation spatiale entre les deux satellites.

Lorsque la distance augmente, l'interférence devient négligeable comparée au signal utile, ce qui est reflété par une valeur élevée de C/I, favorable aux communications.

La courbe met en évidence un principe fondamental en télécommunications spatiales : l'espacement orbital entre satellites est crucial pour limiter les interférences inter-systèmes.

### 3.4.2 Interférence de station adjacente

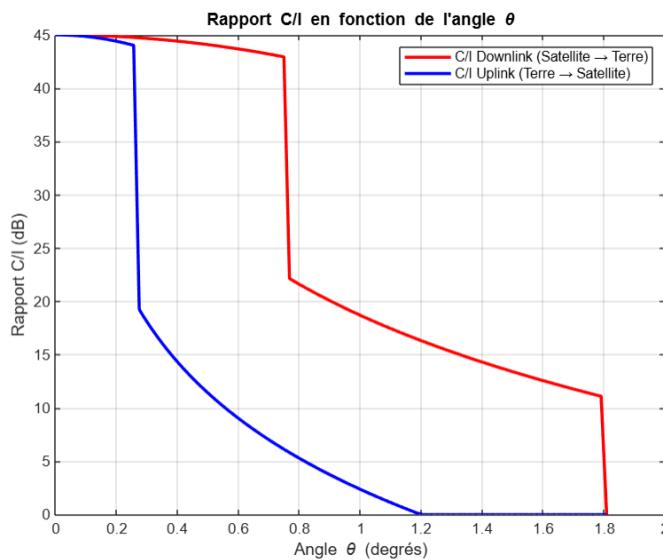


**FIGURE 3.6 – Rapport C/I en fonction de l’EIRP de la station interférante**

La figure 3.6 représente l'évolution du rapport C/I (Carrier to Interference) en dB en fonction de la puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP) de la station terrestre interférente (TSI). On observe une diminution progressive du C/I à mesure que la valeur de l'EIRP de la station interférente augmente.

Cette simulation met en évidence la sensibilité du système satellite à une source d'interférence terrestre adjacente. Elle souligne l'importance de gérer rigoureusement les puissances EIRP des stations au sol dans des environnements à forte densité de stations pour préserver la qualité des communications satellitaires.

### 3.4.3 Interférence co-canal



**FIGURE 3.7 – Rapport C/I en fonction de l’angle**

La figure 3.7 présente le rapport C/I en fonction de l’angle de déviation , elle montre une décroissance progressive du rapport C/I à mesure que l’angle augmente, que ce soit pour la liaison downlink ou uplink.

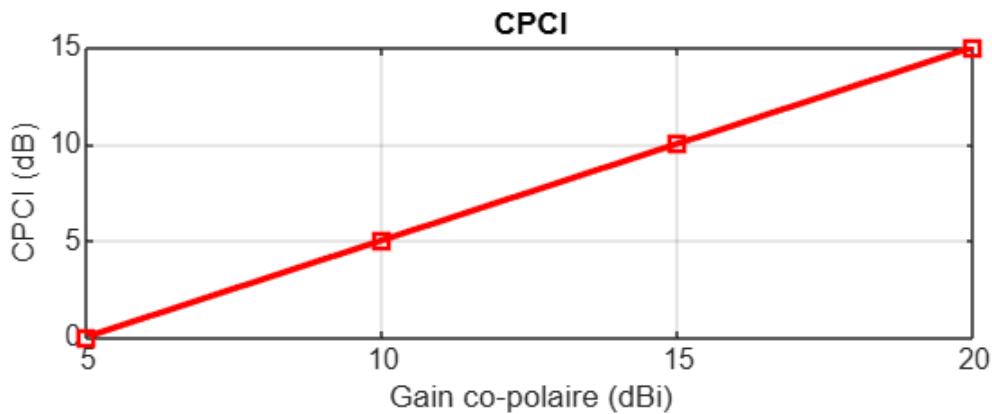
En downlink , C/I en fonction de l’angle montre une décroissance progressive à mesure que l’angle s’éloigne du centre du faisceau. Cela est dû au fait que le gain de l’antenne satellite diminue lorsque l’angle augmente. Plus l’angle est grand, plus l’antenne satellite reçoit des signaux provenant de directions non optimisées, ce qui augmente l’interférence.

De même, la courbe pour l’uplink.

L’interférence co-canal est plus importante à des angles élevés, ce qui diminue la qualité du signal à mesure que l’on s’éloigne du faisceau principal. Dans les systèmes de communication satellite, il est crucial de prendre en compte l’orientation des antennes et de minimiser l’interférence, notamment en évitant d’avoir des utilisateurs ou stations trop éloignés de l’axe du faisceau, où l’interférence devient plus dominante.

### 3.4.4 Interférence cross-polarisation (CPCI)

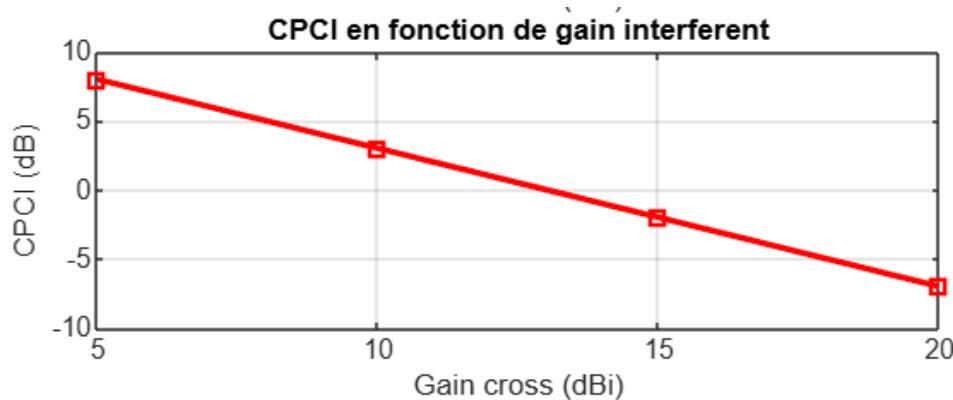
#### Cas 1 : Augmentation du $G_{main}$



**FIGURE 3.8 – Évolution du CPCI en fonction de  $G_{main}$**

La figure 3.8 présente l'évolution du Cross-Polarization Isolation (CPCI) en fonction du gain co-polaire, ce dernier étant modulé par différentes valeurs de gain entre 5 dBi et 20 dBi. À mesure que le gain co-polaire augmente, on observe une augmentation du CPCI, ce qui indique une meilleure isolation entre les polarisations principales et croisées.

#### Cas 2 : Augmentation du $G_{cross}$



**FIGURE 3.9 – Évolution du CPCI en fonction de  $G_{cross}$**

La figure 3.9 analyse l'impact de l'augmentation du gain croisé sur le CPCI. Contrairement à la figure précédente, cette simulation maintient un gain co-polaire constant (13 dBi) et fait

varier le gain croisé entre 5 dBi et 20 dBi. Nous remarquons une tendance à la baisse du CPCI à mesure que le gain croisé augmente, indiquant une augmentation de l’interférence croisée lorsque le gain de l’antenne croisée devient plus important.

Les résultats des simulations indiquent clairement qu’un ajustement judicieux des gains co-polaire et croisé est crucial pour optimiser le Cross-Polarization Isolation (CPCI) dans les systèmes de communication satellitaire. Dans le premier cas, l’augmentation du gain co-polaire améliore le CPCI en réduisant l’interférence entre les polarisations, tandis que dans le second cas, l’augmentation du gain croisé tend à dégrader cette isolation.

### 3.5 Conclusion

Ce chapitre présente une simulation des interférences satellitaires, permettant d’analyser leur impact et de poser les bases de futures solutions d’atténuation.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

À travers une analyse approfondie des sources d’interférences et de leur impact, nous avons pu saisir l’ampleur des enjeux auxquels sont confrontées les technologies spatiales aujourd’hui.

Les simulations menées ont révélé des pistes prometteuses pour atténuer ces interférences, mais elles ont aussi mis en évidence qu’une réponse efficace nécessitera des innovations constantes, à la fois technologiques et méthodologiques. Si les interférences demeurent un obstacle majeur, elles offrent également une occasion unique de repousser les frontières des systèmes de communication satellitaires en développant des solutions plus robustes et adaptables.

Ce projet, tout en étant une base solide pour de futures innovations, témoigne également du potentiel énorme que recèle la technologie satellitaire dans la réponse aux défis de connectivité mondiale.

Afin de prolonger les résultats obtenus et répondre aux défis identifiés, il est essentiel d’orienter les recherches vers des solutions concrètes et durables. Deux axes prioritaires se dessinent : proposer des solutions pour minimiser ou éliminer les interférences, et développer des techniques de détection et de correction en temps réel. Ces approches permettront d’améliorer la robustesse des communications et d’anticiper les perturbations de manière plus efficace.

# BIBLIOGRAPHIE

[1] **IP ACCESS.** OneWeb vs. Starlink : A Head-to-Head Comparison [[en ligne](#)].

Disponible sur : <https://www.ipinternational.net/oneweb-vs-starlink-head-to-head/>

[2] **Space Technology and Systems.** Lecture 1 : Introduction to Satellite Communications Engineering [[en ligne](#)].

Disponible sur : [https://www.youtube.com/watch?v=ZyUfNT00Vx8&list=PLbPW06RB5w6m\\_xizacLr6dMXP58IHq23D&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=ZyUfNT00Vx8&list=PLbPW06RB5w6m_xizacLr6dMXP58IHq23D&index=1)

[3] **Space Technology and Systems.** Lecture 4 : Satellite Link Design Part 2 [[en ligne](#)].

Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=T6LKUyddw5s&t=2375s>

[4] **Oriol VIDAL BARBA.** Systèmes de communication par satellite géostationnaire à très haute capacité de prochaine génération. Techniques avancées de gestion des interférences [[en ligne](#)].

Disponible sur :[https://depozit.isae.fr/theses/2014/2014\\_Vidal\\_Barba\\_Oriol\\_D.pdf](https://depozit.isae.fr/theses/2014/2014_Vidal_Barba_Oriol_D.pdf)

# ANNEXES

## A.1 Bilan de liaison satellitaire

Le **bilan de liaison** (link budget) permet d'évaluer la qualité d'un lien de communication entre une station terrestre et un satellite, en intégrant l'ensemble des gains et pertes subis par le signal. On distingue deux cas fondamentaux :

- **Uplink (liaison montante)** : de la Terre vers le satellite.
- **Downlink (liaison descendante)** : du satellite vers la Terre.

Chacune de ces liaisons est analysée à l'aide de plusieurs paramètres : puissance d'émission, gain d'antenne, pertes de transmission, figure de mérite ( $G/T$ ), pertes dues à l'alignement, température équivalente de bruit, etc.

### A.1.1 Bilan de liaison satellite – Uplink (liaison montante)

Lors de la transmission d'un signal depuis la station terrestre vers le satellite, plusieurs éléments sont essentiels à considérer pour estimer la qualité de la liaison.

#### A.1.1.1 Gain de l'antenne émettrice (station terrestre)

Le gain de l'antenne parabolique est calculé à partir de plusieurs paramètres, tels que :

- Le **diamètre de l'antenne**,
- La **fréquence d'émission** de la liaison montante,
- L'**efficacité de l'antenne**.

$$G_{\text{TXmax}} = \left( \frac{\eta \cdot \pi \cdot D_{\text{TX}} \cdot f_u}{c} \right)^2$$

Où :

- $\eta$  : efficacité de l'antenne,
- $D_{\text{TX}}$  : diamètre de l'antenne,
- $f_u$  : fréquence d'émission,
- $c$  : vitesse de la lumière.

#### A.1.1.2 EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)

L'EIRP de la station terrestre est donnée par la relation suivante :

$$\text{EIRP}_{\text{UL}} = P_{\text{TX}} + G_{\text{TXmax}} - L_{\text{TXM}} - LF_{\text{TX}}$$

Où :

- $P_{\text{TX}}$  : puissance transmise par l'antenne,
- $G_{\text{TXmax}}$  : gain de l'antenne parabolique,
- $L_{\text{TXM}}$  : perte due au désalignement de l'antenne,
- $LF_{\text{TX}}$  : perte de la ligne de transmission.

#### A.1.1.3 Perte de chemin total

$$L = L_{\text{FSPL}} + L_A$$

#### A.1.1.4 Figure de mérite du satellite $(G/T)_{\text{ULsat}}$

La température de bruit effective  $T$  est donnée par :

$$T = \frac{T_A}{L_{\text{FRX}}} + T_F \left( 1 - \frac{1}{L_{\text{FRX}}} \right) + T_{\text{eRX}}$$

Où :

- $T_A$  : température d'antenne,
- $L_{\text{FRX}}$  : perte de la ligne de réception,
- $T_F$  : température de la station,
- $T_{\text{eRX}} = (F - 1)T_0$  : température équivalente de bruit.

Le gain de réception :

$$G_{\text{RXmax}} = 10 \log_{10} \left( \eta \cdot \left( \frac{70 \cdot \pi}{\theta_{\text{RX3dB}}} \right)^2 \right)$$

#### A.1.1.5 Rapport signal sur bruit spectral ( $S/N_0$ )

$$\left( \frac{S}{N_0} \right)_{\text{UL}} = \text{EIRP}_{\text{UL}} - L + \left( \frac{G}{T} \right)_{\text{ULsat}} - 10 \log_{10}(k)$$

### A.1.2 Bilan de liaison satellite – Downlink (liaison descendante)

ors de la réception d'un signal depuis le satellite vers la station terrestre (downlink), plusieurs éléments sont essentiels à considérer pour estimer la qualité de la liaison.

#### A.1.2.1 EIRP du satellite

$$\text{EIRP}_{\text{DL}} = P_{\text{TX}} + G_{\text{TXmax}} - L_{\text{TXM}} - LF_{\text{TX}}$$

$$G_{\text{TXmax}} = \eta \cdot \left( \frac{70 \cdot \pi}{\theta_{\text{TX3dB}}} \right)^2$$

### A.1.2.2 Perte de chemin total

$$L = L_{\text{FSPL}} + L_A$$

### A.1.2.3 Figure de mérite de la station terrestre $(G/T)_{\text{DL}_{\text{ES}}}$

$$T = \frac{T_A}{L_{\text{FRX}}} + T_F \left( 1 - \frac{1}{L_{\text{FRX}}} \right) + T_{\text{eRX}}$$

avec  $T_A = T_{\text{Sky}} + T_{\text{Ground}}$

$$G_{\text{RXmax}} = 10 \log_{10} ((\eta \cdot D_{\text{RX}} \cdot f_D)^2)$$

$$\left( \frac{G}{T} \right)_{\text{DL}_{\text{ES}}} = G_{\text{RXmax}} - L_{\text{RXM}} - L_{\text{FRX}} - 10 \log_{10}(T)$$

### A.1.2.4 Rapport signal sur bruit spectral ( $\text{S}/\text{N}_0$ )

$$\left( \frac{S}{N_0} \right)_{\text{DL}} = \text{EIRP}_{\text{DL}} - L + \left( \frac{G}{T} \right)_{\text{DL}_{\text{ES}}} - 10 \log_{10}(k)$$

[3]