

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان –
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Systèmes de Télécommunications

Par : **ZEGGAI Sara** et **ZOUAG Bilal Mohamed**

Sujet

Étude d'une liaison radio avec relais et calcul du bilan de liaison

Soutenu publiquement, le **08 /06 / 2017** , devant le jury composé de :

Mr BENDIMERAD Fethi Tarik	Professeur à l'université de Tlemcen	Président
Mr DERRAZ Fouad	MCB à l'université de Tlemcen	Examineur
Mr BOUSAHLA Miloud	MCB à l'université de Tlemcen	Examineur
Mr MERIAH Sidi Mohammed	Professeur à l'université de Tlemcen	Encadrant



Dédicace

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance... Aussi, c'est tout simplement que
Je dédie cette mémoire ...*

A mes très chers parents, source de mes joies, secret de ma force, Vous serez toujours le modèle,

Papa dans ta détermination, ta restriction pour ton amour, ta patience ta force, ton honnêteté et tes considérables sacrifices pour me parvenir à ce niveau,

Maman dans ta bonté, ta patience et ton grand amour.

Merci pour tous vos sacrifices pour que vos enfants grandissent et prospèrent

Merci de trimer sans relâcher malgré les péripéties de la vie

Merci d'être tout simplement mes parents

C'est à vous que je dois cette réussite et je suis fière de vous l'offrir.

Maman papa je vous aime.

À mes frères Adel et Amine, En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Je dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur de santé à ma très chère petite sœur Marwa, le bijou de la famille, pour toute l'ambiance dont tu m'as entourée, pour toute la spontanéité et ton élan chaleureux,

Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A ma sœur Soumia en souvenir d'une enfance dont nous avons partagé les meilleurs et les plus agréables moments. Pour toute la complicité et l'entente qui nous unissent,

sans oublier mon très cher beau-frère Samir et mes chers petits neveux Salah Eddine et Yasser,

Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour ma chère cousine Kawter.

Un grand merci à mon cousin Mohammed et sa femme Amina.

À tous les membres de la famille ZEGGAI grand et petit,

A mes chers ami(e)s:

Maghnia, Iman, Sara, Bouchra, Yousra, Halima, Ikram, Ghouti, Walid,...

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi, des frères, des sœurs et des amis sur qui je peux compter.

En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Une dédicace très spéciale à mon amour Salah Eddine.

Depuis le jour où je t'ai connu ma vie est comblée de bonheur, merci mon chéri d'être à mes coté chaque jour, merci pour tes encouragements, tu as toujours trouvé les mots qui conviennent pour me remonter le morale dans les moments pénibles, grâce a toi j'ai pu surmonter toutes les difficultés.

Tu m'as aussi aidé à réaliser ce travail que j'espère sera témoignage de mon profond amour pour toi.

Que dieu nous bénisse, protège notre amour et nous aide à réaliser tous nos rêves partagés.

"En essayant continuellement de finir par réussir. Dont plus ça rate, plus on a des chances que ça marche !"



ZEGGAI Sara



Dédicace

Je dédie ce mémoire ... 

À Mes parents

*Que j'aime tant et qui m'ont soutenu durant ce long chemin d'étude
je les remercie de leur confiance et de leur amour.*

J'espère que le fruit de mes efforts leurs apporteront fierté.

À Mes sœurs et mon frère

Pour leurs encouragements continus et pour toute ma famille.

*À la promotion Réseaux et systèmes de télécommunication RST
2017 de l'université de Tlemcen*

*Je cite en particulier : MAHI Kheireddine et Halima KERZABI : je
vous souhaite une vie pleine de réussite, santé et de bonheur.*

À tous mes enseignants dont la liste s'allonge d'une année à un autre

*À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail
à tous ceux que j'ai omis de citer.*

ZOUAG BILAL



Remerciements

Avant tout nous tenons notre remerciements à notre dieu tout puissant de notre avoir donné la force et le courage pour accomplir ce modeste mémoire.

*Au terme de ce travail, non tenant à remercier particulièrement **Mr.MERJAH Sidi Mohammed** encadreur Professeur à l'université ABOU-BEKR-BELKAID de Tlemcen et responsable du laboratoire LTT pour son encadrement, ses conseils, Sa disponibilité, ses critiques et ses remarques pertinentes. Il nous a conseillé et guidé du début du mémoire à sa fin.*

*Nous voudrions très sincèrement remercier Mr **BENDIMERAD Fethi Tarik**, Professeur à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de juger ce travail en présidant le jury, ainsi que Mr **BOUSAHLA Miloud** et Mr **DERRAZ Fouad** maitres de conférences classe B à l'université de Tlemcen. Vous nous avez honorés d'accepter de siéger parmi notre jury de mémoire.*

*On voudrait aussi adresser nos sincères remerciements a Mr **Bakhti Mohamed** ainsi que Monsieur le directeur de CDS Oran Mr **Kamesh Mohamed** pour leurs accueil au sein de centre dans le cadre de notre stage pratique.*

Et finalement on tient à remercier chaleureusement et respectivement tous ceux qu'ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet de fin d'étude de master.

SARA ET BILAL

Résumé

Ce mémoire de master consiste à étudier une liaison radio avec relais et de calculer son bilan de liaison, tout en tenant compte des atténuations du signal par son environnement de propagation. Il contient en première partie une étude générale sur les liaisons radios. Dans cette partie, nous avons donné une introduction à la transmission FH dans le cas d'une communication terrestre, et aussi dans le cas d'une communication par satellite.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié les différents cas d'affaiblissements comme l'affaiblissement du aux gaz atmosphérique, l'affaiblissement du à la pluie, de nuages ou de brouillard et l'affaiblissement à la végétation. Le but de cette étude est d'élargir notre étude par la réalisation d'une application sous Matlab permettant de calculer ces différentes atténuations grâce à des formules qui existent dans la littérature.

Dans la dernière partie de notre travail, nous avons proposé une interface graphique pour le calcul de bilan de liaison soit dans le cas d'une liaison terrestre ou Satellitaire.

Mots Clé : Liaison radio, Affaiblissement, Bilan de liaison, Satellite, interface graphique.

Summary

This master's thesis consists of studying a radio link with relays and calculating its Link budget, while taking into account the attenuations of the signal by its propagation environment. It contains, as a first part, a general study on radio links. In this section, we have given an introduction to FH transmission in the case of terrestrial communication, and also in the case of satellite communication.

In a second time, we have studied the various cases of weaknesses such as the weakening of the atmospheric gas, the weakening of rain, clouds or fog, and the weakening of vegetation. The purpose of this study is to extend our study by the realization of an application under Matlab allowing calculating these different attenuations thanks to formulas that exist in the literature.

In the last part of our work, we have proposed a graphical interface for the calculation of the link balance in the case of a terrestrial or satellite link.

Key words: Radio link, Weakening, Link budget, Satellite, graphical interface.

التلخيص

هذه الذاكرة الرئيسية للماستر تهدف الى اجراء دراسة حول اتصال لاسلكي مع التبديلات وحساب الميزانية العمومية لهذا الاتصال، مع الأخذ بعين الاعتبار الاضمحلال في الإشارات على بيئة انتشارها. بحيث يتضمن الجزء الأول، دراسة عامة عن الوصلات اللاسلكية؛ في هذا القسم قمنا بإعطاء مقدمة عن الاتصال في حالة ما اذا كانت أرضية و أيضا في حالة الاتصال عبر الأقمار الصناعية.

في الخطوة الثانية، درسنا حالات الضعف المختلفة مثل ضعف الغاز الجوي، وضعف المطر، السحب أو الضباب، وضعف الغطاء النباتي. اد قمنا بتوسيع دراستنا من خلال تحقيق تطبيق يضمن لنا حساب هذه الحالات و ذلك من خلال ادخال معطيات و قوانين تم استخدامها.

في الجزء الأخير من عملنا، اقترحنا على واجهة رسومية لحساب ميزانية الوصلة في حالة وجود اتصالات أرضية أو فضائية.

الكلمات المفتاحية: وصلة راديوية، إضعاف، ميزانية الوصلة، قمر اصطناعي، واجهة رسومية.

Table des matières

Listes des figures.....	1
Liste des tableaux.....	4
Liste des acronymes.....	5
INTRODUCTION GENERAL.....	6
CHAPITRE I INTRODUCTION A LA TRANSMISSION FH.....	8
I.1 Introduction.....	9
I.2 Un bref historique des télécommunications.....	9
I.3 Les supports de transmission.....	9
I.4 Faisceaux hertziennes.....	10
I.4.1 Définition.....	10
I.4.2 Les usages des faisceaux hertziens.....	10
I.4.3 Constitution.....	10
I.4.4 Types de faisceaux hertziennes.....	11
I.4.5 Caractéristique.....	11
I.4.6 Les modulations utilisées en FH.....	11
I.4.6.1 FH analogiques.....	11
I.4.6.2 FH numériques.....	11
I.4.7 Avantages/inconvénients.....	12
I.5 Qu'est-ce que la Radio.....	12
I.5.1 Principe d'une liaison radio.....	12
I.5.2 Comment faire pour que tout le monde puisse communiquer en même temps ?.....	13
I.5.3 Comment garantir la confidentialité entre l'émetteur et le récepteur ?.....	13
I.6 Description des bandes de fréquences.....	13
I.7 Choix des fréquences porteuses.....	14

I.8	Description du système FH	14
I.8.1	Les antennes	16
I.8.1.1	Définition	16
I.8.1.2	Paramètres caractéristiques d'une antenne.....	16
I.8.1.3	Les types d'antennes	17
I.9	Communication par satellite.....	19
I.9.1	Constitution d'un satellite	19
I.9.2	Constitution générale d'une liaison par satellite.....	19
I.9.3	Services offerts par satellite	21
I.9.4	EXEMPLES D'APPLICATIONS.....	21
I.9.4.1	Orbite terrestre basse (LEO).....	21
I.9.4.2	Orbite terrestre moyenne (MEO).....	22
I.9.4.3	Orbite Terrestre Géostationnaire (GEO)	22
I.10	Aperçue sur le logiciel Bilan-TSat	23
I.10.1	Présentation de l'interface	23
I.11	Conclusion.....	25
CHAPITRE II L'ATTENUATION SUR LE BILAN DE LIAISON		26
II.1	Introduction	27
II.2	Définition d'une atténuation.....	27
II.3	Affaiblissement de signal à la végétation.....	27
II.4	Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère	28
II.4.1	Affaiblissement linéique.....	29
II.4.2	Evaluation approchée de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère dans la gamme de fréquences 1-350 GHz.....	30
II.4.2.1	Affaiblissement linéique	30
II.4.3	Affaiblissement sur un trajet	32
II.4.3.1	Trajets terrestres.....	32

II.4.3.2	Trajets obliques.....	33
II.4.3.3	Trajets inclinés.....	34
II.5	Hydrométéores	35
II.5.1	Affaiblissement de signal à la pluie, nuage et aux brouillards	37
II.5.1.1	Pluie.....	37
II.5.1.2	Nuages ou de brouillard.....	38
II.6	Exemples de calcul	40
II.6.1	Cas 1 : Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère	40
II.6.2	Cas 2 : Affaiblissement dû au nuage ou de brouillard.....	41
II.6.3	Cas 3 : Affaiblissement de signal à la pluie	42
II.6.4	Cas 4 : Affaiblissement de signal à la végétation	43
II.6.5	Affaiblissement Total.....	44
II.7	Conclusion.....	46
CHAPITRE III	BILAN DE LIAISON	47
III.1	Introduction	48
III.2	Bilan de liaison hertzienne	48
III.2.1	Définition	48
III.2.2	Sensibilité d'un récepteur	49
III.2.3	Expression de la puissance reçue	49
III.2.4	Condition de bon fonctionnement d'une liaison hertzienne.....	50
III.3	Les zones de rayonnement d'une antenne.....	50
III.3.1	Zone de Rayleigh.....	51
III.3.2	Zone de Fresnel	51
III.3.2.1	Méthode Deygout pour la diffraction à plusieurs obstacles	52
III.3.3	Zone de Fraunhofer	52
III.4	Bilan de liaison satellitaire	53
III.4.1	Bilan de Liaison pour la voie montante.....	53

III.4.2 Bilan de liaison pour la voie descendante	55
III.4.3 Bilan de liaison global.....	56
III.5 Température de bruit d'un système	57
III.5.1 Température de bruit d'une antenne de station sol.....	58
III.5.1.1 Ciel clair	58
III.5.1.2 Pluie.....	58
III.6 Calculs effectués et résultats	58
III.7 Les étapes d'application	58
III.7.1 L'interface de calculs	58
III.7.2 Présentation de l'interface	61
III.7.2.1 Liaison terrestre.....	62
III.7.2.2 Exemples d'application	66
III.7.2.3 Liaison satellitaire	70
III.7.2.4 Exemples d'application	71
III.8 Conclusion.....	88
CONCLUSION GENERAL	89
Bibliographie.....	90

Listes des figures

Figure I.1 Constitution d'une liaison hertzienne	10
Figure I.2 Principe d'émission-réception	12
Figure I.3 La structure générale d'une liaison hertzienne.....	15
Figure I.4 Schéma synoptique typique d'un faisceau hertzien	15
Figure I.5 L'antenne demi-onde.....	18
Figure I.6 La structure de l'antenne Yagi.....	18
Figure I.7 Synoptique d'une liaison via satellite.....	20
Figure I.8 Liaison satellitaire mode duplex.....	20
Figure I.9 Liaison satellitaire mode simplex.....	21
Figure I.10 Alsat-1N avec ses antennes déployées	22
Figure I.11 Logo Matlab	23
Figure I.12 Boite de dialogue.....	24
Figure I.13 Organigramme générale de l'application	24
Figure II.1 Affaiblissement de signal à la végétation	27
Figure II.2 Simulation « Atténuation provoquée par un arbre ».....	28
Figure II.3 Atténuation linéique des gaz de l'atmosphère p : 1013.6 mbar ; T=20° ; Vapeur d'eau =7.5 g/m3.....	28
Figure II.4 Simulation Matlab « gaz de l'atmosphère »	29
Figure II.5 Atténuation linéique des hydrométéores.....	35
Figure II.6 Affaiblissement du à la pluie à l'aide de simulateur Matlab	37
Figure II.7 Affaiblissement par le brouillard à l'aide de simulateur Matlab	39
Figure II.8 Résultat obtenue pour l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère	41
Figure II.9 Résultat obtenue pour l'affaiblissement dû au nuage ou de brouillard	42
Figure II.10 Résultat obtenue pour l'affaiblissement de signal à la pluie	43
Figure II.11 Résultat obtenue pour l'affaiblissement de signal à la végétation.....	44

Figure II.12 Résultat total obtenue pour les différents affaiblissements	45
Figure III.1 Schéma de principe d'une liaison hertzienne	48
Figure III.2 Les zones de rayonnement d'une antenne.....	51
Figure III.3 Zone de Fresnel avec obstacle.....	52
Figure III.4 Liaison Satellitaire	523
Figure III.5 Etude de la liaison montante	53
Figure III.6 Etude de la liaison descendante.....	55
Figure III.7 Organigramme générale	59
Figure III.8 Organigramme détaillé dans le cas satellitaire	59
Figure III.9 Organigramme détaillé dans le cas terrestre	60
Figure III.10 Organigramme des différentes affaiblissements	61
Figure III.11 Boite de dialogue.....	61
Figure III.12 Boite de dialogue.....	62
Figure III.13 Interface d'un milieu sans obstacle-sans atténuations-	63
Figure III.14 Interface d'un milieu sans obstacle -Avec des atténuations-	63
Figure III.15 Interface d'un milieu avec obstacles-sans atténuations-	64
Figure III.16 Interface d'un milieu avec obstacles « Avec des atténuations ».....	65
Figure III.17 boite de dialogue pour les différents cas d'atténuations	65
Figure III.18 Les différentes atténuations.....	66
Figure III.19 Exemple d'application pour le milieu sans obstacle –sans atténuation-	67
Figure III.20 Exemple d'application pour le milieu sans obstacle-avec des atténuations-	68
Figure III.21 Exemple d'application pour le deuxième choix	68
Figure III.22 Exemple d'application pour le deuxième choix « Avec des atténuations ».....	69
Figure III.23 Boîte de dialogue.....	70
Figure III.24 Interface satellite MEO	71

Figure III.25 Bilan de liaison de la voie montante d'un satellite MEO.....	74
Figure III.26 Bilan de liaison de la voie descendante d'un satellite MEO.....	74
Figure III.27 Bilan de liaison total d'un satellite MEO.....	75
Figure III.28 Interface d'un satellite LEO.....	76
Figure III.29 Bilan de liaison de la voie montante d'Alsat-1N.....	79
Figure III.30 Bilan de liaison de la voie descendante d'Alsat-1N.....	79
Figure III.31 Bilan de liaison total de satellite Alsat-1N.....	80
Figure III.32 Interface satellite GEO.....	81
Figure III.33 Bilan de Liaison montante d'un satellite GOE sans la pluie.....	83
Figure III.34 Bilan de Liaison montante d'un satellite GEO avec la pluie.....	83
Figure III.35 Bilan de Liaison descendante sans la pluie.....	85
Figure III.36 Bilan de Liaison descendante avec la pluie.....	86
Figure III.37 Bilan de liaison total de satellite GEO sans la pluie.....	87
Figure III.38 Bilan de liaison total d'un satellite GEO avec la pluie.....	87

Liste des tableaux

Tableau I.1 Désignation des bandes de fréquences	13
Tableau I.2 Désignation des bandes de fréquences	14
Tableau II.1 Coefficients k et a avec modèle de Laws et Parsons.....	36
Tableau II.2 Résultat d'affaiblissement du aux gaz de l'atmosphère pour différent valeurs de fréquences	41
Tableau II.3 Résultat d'affaiblissement du au nuage ou de brouillard pour différent valeurs de fréquences	42
Tableau II.4 Résultat d'affaiblissement de signal à la pluie pour différent valeurs de fréquences.....	43
Tableau II.5 Résultat d'affaiblissement de signal à la végétation pour différent valeurs de fréquences	44
Tableau II.6 Résultat des différents affaiblissements pour deux valeurs de fréquences.....	45
Tableau III.1 Présentation des données	66
Tableau III.2 Les puissances reçues pour le premier choix.....	67
Tableau III.3 Comparaison des valeurs de puissance reçu	69
Tableau III.4 Les résultats de rayon cas avec obstacle.....	70
Tableau III.5 Caractéristique pour la voie montante d'un satellite MEO	72
Tableau III.6 Caractéristique pour la voie descendante d'un satellite MEO.....	73
Tableau III.7 Liaison Total Satellite MEO.....	75
Tableau III.8 Bilan de liaison de la voie Montante Alsat-1N	77
Tableau III.9 Bilan de liaison de la voie Descendante Alsat-1N	78
Tableau III.10 Bilan de liaison total de satellite Alsat-1N	80
Tableau III.11 Caractéristique pour la voie Montante GEO	82
Tableau III.12 Caractéristique pour la voie descendante GEO	85
Tableau III.13 Bilan de liaison total d'un satellite GEO	86

Liste des acronymes

- AM:** Amplitude Modulation.
- ASK:** Amplitude-shift keying.
- DECT:** Digital Enhanced Cordless Telecommunication.
- EM:** Électromagnétique.
- FH :** Faisceau hertziens.
- FHA:** Faisceau hertziens analogique.
- FHN :** Faisceau hertzien numérique.
- FM:** Frequency Modulation.
- FSK:** Frequency-shift keying.
- LOS:** Line Of Sight.
- OEM:** Onde Électromagnétique.
- ONU :** Organisation des Nations unies.
- PSK:** Phase shift keying.
- QAM:** Quadrature Amplitude Modulation.
- QPSK:** Quaternary Phase Shift Keying.
- RADAR:** Radio Detection and ranging.
- S/B:** Signal sur Bruit.
- TSF:** Télégraphie Sans Fil.
- UIT:** Union Internationale des Télécommunications.
- VHF:** Very High Frequency.
- Wi-Fi:** Wireless Fidelity.

INTRODUCTION GENERAL

Les hommes ont toujours eu besoin de communiquer malgré les distances. Autrefois, les porteurs de messages remplissaient cette mission, mais il a fallu trouver des moyens de communication plus rapides et plus sûrs, quels que soient les obstacles à franchir.

La communication en général et les télécommunications en particulier se situent de plus en plus au centre des activités de la vie quotidienne. En effet depuis son ouverture à la concurrence qui n'a cessé de s'approfondir à partir des années 1980, le secteur des télécommunications a connu une profonde évolution technologique, économique, réglementaire, et financière.

De cette évolution, l'on est passé aux liaisons hertziennes ensuite aux liaisons par satellite ces derniers sont devenues presque omniprésentes dans nos vies.

Les communications sans fils représentent aujourd'hui la plus grande part de l'industrie des télécommunications. En effet, les utilisateurs exigent en tout temps la mobilité, le haut débit et le multimédia. Dans ce système de communication sans fil, les émetteurs et les récepteurs sont reliés par des ondes électromagnétiques. Il n'existe aucune liaison physique entre l'émetteur et le récepteur radioélectrique. C'est l'un des services sans fil les plus utilisés.

Le concept radio indique toute communication assurée sans support matériel, ainsi le terme radiocommunication englobe toutes les communications sans fil.

La communication sans fil à micro-ondes est un type de communication efficace. Elle est utilisée dans la liaison point à point à multipoint. Dans une liaison à micro-ondes, il y a deux options : La première option consiste à relier deux points quelconques situés à des distances sur la terre, il s'agit dans ce cas de liaison terrestre. La deuxième utilisation des liaisons micro-ondes dites encore faisceaux hertziens est dans les liaisons entre station terrestre et les satellites placés en orbite.

Un satellite de télécommunications est un relais actif hertzien. C'est un engin qui se sert des ondes électromagnétiques ou hertziennes pour relier deux points terrestres, soit deux pays ou deux continents. Une station terrestre émet en direction du satellite installé dans l'espace libre des ondes électromagnétiques qu'il reçoit, amplifie et change la fréquence. A son tour, après ces traitements, ce satellite artificiel émet les ondes électromagnétiques en direction d'une autre station terrestre. Ce type de communication est utile sur les longues distances, car un satellite géostationnaire peut couvrir un tiers de la terre. D'autres satellites d'une portée inférieure aux satellites géostationnaires peuvent couvrir une région ou tout un pays. Le principal inconvénient des signaux micro-ondes est leur vulnérabilité par rapport aux mauvais temps, en particulier la pluie et les grands problèmes est de savoir comment ces composants sont bien placés, voilà la question qui nous préoccupe dans ce travail.

Nous tenons à calculer le bilan d'une liaison de transmission par faisceau hertzien afin de s'assurer du bon fonctionnement (l'échange d'information, le transfert de fichiers et de messages).

Au cours de ce travail de projet de fin d'étude, nous avons développé une interface graphique permettant le calcul du bilan de liaison dans un environnement satellitaire, terrestre avec ou sans obstacles Cet outil de calcul a été validé sur plusieurs cas d'exemples tirés de la littérature.

Le manuscrit de ce mémoire est composé de trois chapitres :

Nous avons au premier chapitre étudié le système de transmission par faisceaux hertziens, ou nous avons présenté la structure générale d'une liaison FH et donné une généralité sur les satellites.

Au deuxième chapitre, nous avons expliqué les différents cas d'affaiblissements comme l'affaiblissement due aux gaz atmosphériques, l'affaiblissement due à la pluie, de nuages ou de brouillard et l'affaiblissement due à la végétation. et on termine avec des exemples fait à l'aide de simulateur Matlab sous forme d'une interface graphique.

Enfin au troisième chapitre, nous avons donné en détaille le formalisme de calcul du bilan de liaison, tout en proposant un logiciel permettant de calculer le bilan de liaison dans un environnement satellitaire et terrestre avec et sans obstacle.

CHAPITRE I
INTRODUCTION A
LA TRANSMISSION
FH

I.1 Introduction

Une chaîne de transmission est l'ensemble des dispositifs permettant le transport d'une information sur des distances souvent importantes. Cette transmission comprend trois éléments essentiels: Une source, un canal de transmission et un destinataire. Dans ce chapitre, nous essayons de présenter les principales caractéristiques de la transmission des informations.

I.2 Un bref historique des télécommunications

La transmission à distance de l'information a toujours été une préoccupation humaine importante. Dans l'antiquité, des messagers parcouraient à pied la distance entre l'émetteur et le récepteur du message. A cette époque, l'information ne se déplaçait pas à la vitesse de la lumière et on ne connaissait pas les autoroutes de l'information. Plus tard, l'homme a utilisé des liaisons optiques. D'abord rudimentaires (signaux de fumée, feu pour avertir d'un danger), elles ont été améliorées plus tard : le télégraphe Chappe permettait vers 1800 de transmettre des messages en utilisant des signaux optiques à l'aide de sémaphores.

En 1832, Samuel Morse invente le télégraphe. C'est le premier système de transmission utilisant des signaux électriques se propageant sur une ligne. On transmet sur la ligne une suite d'impulsions brèves ou longues pour créer des symboles (lettres de l'alphabet). Ce système était très intéressant mais il nécessitait un support physique (une ligne électrique) entre l'émetteur et le récepteur. A la fin du 19eme siècle, les physiciens ont mis en évidence les ondes électromagnétiques (Maxwell, Hertz). Guglielmo Marconi, un physicien italien réalise en 1895 la première transmission radio (on parlait alors de TSF : Télégraphie sans fil) sur une distance de 1,5 km.

Au cours de 20ème siècle, les progrès ont été spectaculaires : En France, en février 2009, il y avait 58 millions de clients aux téléphones mobiles pour un peu plus de 64 Millions de Français .Nous vivons à l'époque des télécommunications ! [1]

I.3 Les supports de transmission

Dans les télécommunications, on distingue actuellement trois grandes familles :

- les liaisons filaires.
- les liaisons hertziennes.
- les liaisons optiques.

Il existe deux types de liaisons optiques :

- liaison par fibre optique (optique guidée).
- liaison optique en espace libre (exemple : liaison infrarouge télécommande-téléviseur).

Nous n'étudierons en détail dans ce chapitre que les liaisons hertziennes, car notre interconnexion se fera par faisceaux hertziens [1].

I.4 Faisceaux hertziennes

I.4.1 Définition

Un faisceau hertzien est un système de transmission de signaux (aujourd'hui principalement numériques) bilatérale et permanente entre deux points fixes : on parle de liaison point à point. Il utilise comme support les ondes radioélectriques avec des fréquences porteuses de 1.5 GHz à 38 GHz (domaine des micro-ondes), très fortement concentrées à l'aide des antennes directives. A débit donné, la portée se réduit lorsque la fréquence du FH augmente [2].

I.4.2 Les usages des faisceaux hertziens

Les faisceaux hertziens sont utilisés principalement pour raccorder des points à distance.

- Radiodiffusion (en modulation d'amplitude ou de fréquence)
- Télédiffusion (analogique ou numérique, terrestre ou par satellite)
- Radiocommunications : Talkie-walkie, liaison VHF pour avions ou bateaux
- Téléphonie : téléphone DECT (réseau de téléphones sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise), téléphone mobile.
- Internet : Liaison Wifi (réseau Internet sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise) [1].

Les technologies FH sont beaucoup utilisées dans le cadre du déploiement des réseaux de téléphonie mobile.

I.4.3 Constitution

Le système de transmission par faisceaux hertziens est constitué par :

- Des stations terminales utilisant les émetteurs et des récepteurs dirigeant dans le même sens.
- Des stations relais : utilisant les émetteurs et les récepteurs dans le sens contraire [3].

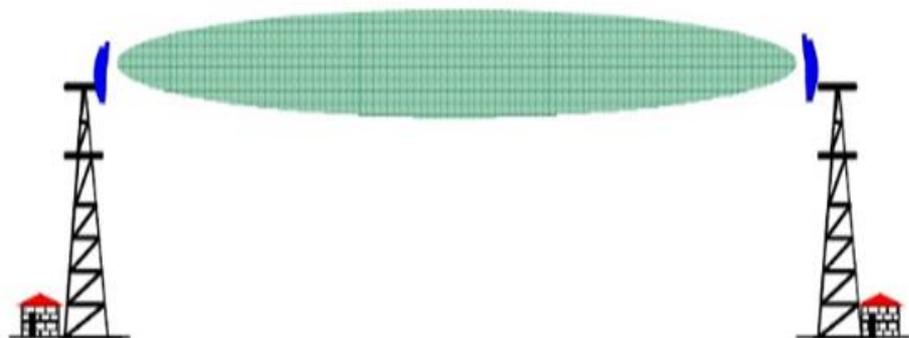


Figure I.1 Constitution d'une liaison hertzienne

I.4.4 Types de faisceaux hertziennes

Il existe deux types de faisceaux hertziens à savoir :

- Les faisceaux hertziens en visibilité directe.
- Les faisceaux hertziens transhorizon ou troposphériques.

I.4.5 Caractéristique

Les faisceaux hertziens présentent certaines caractéristiques :

- La sécurité : la liaison par faisceau hertzien doit donner une sécurité, c'est ainsi qu'on l'équipe de station avec des matériels radios de très grandes fiabilité c'est-à-dire de très haute fréquence et on utilise des antennes extrêmement directives à des gains qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de dB.
- Duplex : la transmission se fait dans les deux sens, donc elle suppose l'emploi de deux fréquences distinctes dans les deux sens.
- Une succession des stations relais ayant pour chaque sens de transmission des émetteurs, des récepteurs et des antennes.
- Un rapport signal bruit(S/B) élevé.
- Le réglage se fait à l'aide des appareils de mesure appropriés avec une procédure bien établie [3].

I.4.6 Les modulations utilisées en FH

On peut classer les FH en deux catégories [4] :

I.4.6.1 FH analogiques

En modulation d'amplitude, l'information utile est véhiculée par l'amplitude du signal porteur. Or en réception, les éléments traversés par le signal présentent parfois des non linéarités en amplitude, ce qui altère la qualité du signal après démodulation. La propagation de la porteuse dans l'atmosphère entraîne des variations du niveau de réception d'où après la démodulation, le signal présente des parasites. En tenant compte de ces phénomènes, le choix s'est porté sur la modulation de fréquence pour les FHA car cette modulation ne présente pas les défauts ci-dessus cités et en plus les modulations et démodulations de fréquence sont des réalisations plus faciles [4].

I.4.6.2 FH numériques

Les modulations analogiques, mise au point pour adapter le signal analogique à son support de transmission ne peuvent pas être utilisées pour les signaux numériques. Il a été conçu pour ces signaux un type particulier de modulation dit modulation numériques ou modulation sur fréquence porteuse: ASK, FSK et PSK. Mais, c'est la modulation à saut de phase (PSK) ou modulation multi états qui est généralement utilisée. Aujourd'hui on trouve généralement le QPSK qui tend à être la norme pour la modulation sur fréquence porteuse. Cependant, pour mieux conserver la bande passante, la modulation QAM est aussi utilisée. En général, les FHN à moyenne et grande capacité utilisent une modulation 4 états de phase avec modulation d'une fréquence intermédiaire de 70 MHz ou de 140 MHz. Mais aujourd'hui la limite supérieure est connue seulement par le type de système de transmission [4].

I.4.7 Avantages/inconvénients

L'intérêt principal des liaisons hertziennes :

- Ne nécessitent pas de support physique.
- Un moyen de communication idéal pour les liaisons avec les objets mobiles.
- Les liaisons hertziennes sont intéressantes dans le cas de la diffusion (radio diffusion et télédiffusion), où l'on a un émetteur et plusieurs récepteurs [1].
- Faible coût de déploiement comparé à la fibre optique.
- La possibilité d'avoir des débits et des portées très élevées.
- La fiabilité et la sécurité.
- Faible interférence comparée aux réseaux hertziens classiques.
- Installation facile et rapide [2].

Les inconvénients majeurs sont :

- Ces ondes sont principalement sensibles aux masquages (relief, végétation, bâtiments,...), aux précipitations, aux conditions de réfractivité de l'atmosphère et présentent une sensibilité assez forte aux phénomènes de réflexion.
- Obligation de vue directe entre les paraboles (LOS : Line Of Sight).
- Liaison sensible aux hydrométéores, notamment lors de fortes pluies.
- Exploitation sous licences, sur certaines fréquences.
- Coûts des licences.
- Distance/Débits [5].

I.5 Qu'est-ce que la Radio

Un signal Radio est une onde électromagnétique qui se déplace à la vitesse de la lumière. Correctement codé, ce signal peut transporter de l'information.

I.5.1 Principe d'une liaison radio

Pour établir une telle liaison il faut un émetteur et un récepteur. L'émetteur reçoit un signal électrique qu'il convertit en signal électromagnétique, lequel est conduit vers l'antenne. Ce dernier émet le signal dans la nature où il peut être capté par une ou plusieurs autres antennes. L'antenne réceptrice conduit le signal reçu vers le récepteur d'où est extrait le même signal électrique que celui qui était en entrée de l'émetteur [6].



Figure I.2 Principe d'émission-réception

I.5.2 Comment faire pour que tout le monde puisse communiquer en même temps ?

Ce problème n'existe pas par rapport à une liaison filaire : chacun son câble ! Dans le cas des liaisons hertziennes, ceci impose une gestion stricte des fréquences: Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée [1].

I.5.3 Comment garantir la confidentialité entre l'émetteur et le récepteur ?

N'importe quel «espion» peut intercepter une communication puisque l'information est transmise en «espace libre».

Cet inconvénient est corrigé par l'utilisation de cryptage de l'information entre l'émetteur et le récepteur [1].

I.6 Description des bandes de fréquences

La répartition des fréquences est effectuée par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) Organisme international dont le siège est à Genève et qui dépend de l'ONU.

Divers modes de classification sont utilisées par désignation les bandes de fréquences du spectre EM. Ces classifications sont résumées dans le (tableau I.2) [7].

Bande de fréquence	Désignation	Application Typique
<3 KHz	Extremely Low Frequency ELF	Navigation.
3-30 KHz	Very Low Frequency VLF	Navigation, Sonar
30-300 KHz	Low Frequency LF	Balises, Radio, aide à la navigation.
300KHz-3 MHz	Medium Frequency MF	Radio diffusion AM, Radio Maritime.
3-30 MHz	High Frequency HF	Téléphone, Telegraph et Fax, Radio amateur.
30-300 MHz	Very High Frequency VHF	Télévision, Radio diffusion FM
300MHz-3 GHz	Ultra High Frequency UHF	Télévision, Communication Satellite.
3-30 GHz	Super High Frequency SHF	Radar, Satellite, Liaison Micro-ondes.
30-300 GHz	Extremer High Frequency EHF	Radar, Expérience.

Tableau I.1 Désignation des bandes de fréquences

La classification en bandes Radar (Tableau I.3) date de la seconde guerre mondiale et demeure toujours d'usage aujourd'hui même s'il est recommandé d'utiliser la nouvelle classification militaire [7].

Fréquences	Désignation des bandes des micro-ondes	
	Ancienne	Nouvelle
500-1000MHz	VHF	C
1-26MHz	L	D
2-3GHz	S	E
3-4GHz	S	F
4-6GHz	C	G
6-8GHz	C	H
8-10GHz	X	I
10-12.4GHz	X	J
12,4-18GHz	Ku	J
18-20GHz	K	J
20-26.5GHz	K	K
26.5-40GHz	Ka	K

Tableau I.2 Désignation des bandes de fréquences

I.7 Choix des fréquences porteuses

Le domaine des faisceaux hertziens s'étend de 250 MHz à environ 22 GHz dans ce domaine, seules certaines bandes de fréquences bien définies ont été attribuées aux faisceaux hertziens terrestres.

La partie inférieure du domaine n'offre que des bandes relativement étroites et ne convient qu'à des systèmes de faibles capacités. La plupart de faisceau hertzien se situe au-dessus de 17 GHz. Toutefois, à partir de 12 GHz, l'absorption due à la pluie conduit à un affaiblissement croissant. Ce domaine ne convient pratiquement qu'à des faisceaux numériques.

Par convention internationale (UIT-R), les bandes attribuées ont été divisées en canaux pour les deux sens de transmissions de chaque bond de faisceau hertzien dans un réseau dense (plan de fréquence) est une opération qui doit tenir compte :

- Des couplages parasites possible entre antennes situées sur le même support ; d'interfaces entre faisceau voisin due à l'imparfaite directivité des antennes.
- De la possibilité d'altérer la polarisation (horizontale ou verticale) dans les canaux adjacents.
- De la sélectivité des récepteurs.
- D'un souci d'utilisation optimale du domaine fréquentiel disponible [8].

I.8 Description du système FH

Le faisceau hertzien est un système de type pseudo-4-fils fréquentiel car les deux sens de transmission sont portés par des fréquences différentes.

Les antennes sont généralement communes aux deux sens.

La structure générale d'une liaison hertzienne (analogique ou numérique) sous forme simplifiée est [9] :

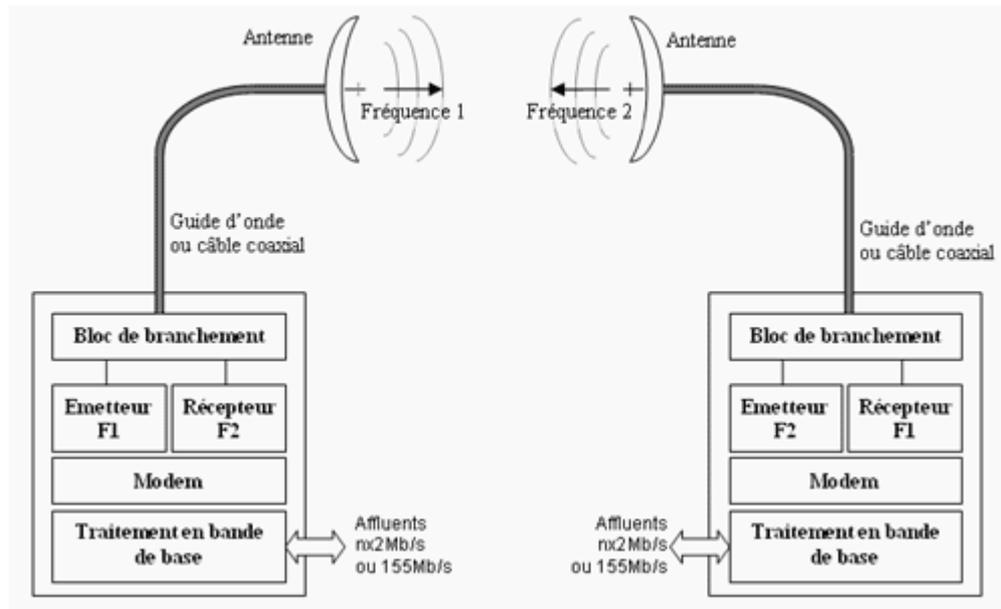


Figure I.3 La structure générale d'une liaison hertzienne

Le schéma synoptique typique d'un faisceau hertzien [9].

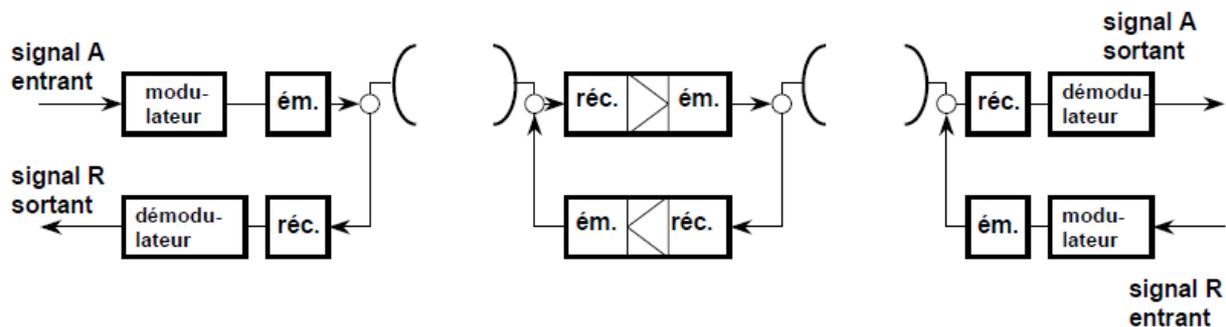


Figure I.4 Schéma synoptique typique d'un faisceau hertzien

Une liaison hertzienne comprend deux stations terminales et des stations relais ; elle est composée d'un ou plusieurs bonds [9].

L'organisation représentée par le schéma ci-dessus est essentiellement celles des FH terrestre, qui sont bidirectionnels.

Afin de se propager correctement, les signaux doivent être modulés sur leur fréquence porteuse. On retrouve donc, à l'entrée de la liaison, un modulateur auquel correspond un démodulateur à la sortie de la liaison.

On trouve ensuite l'émetteur qui transpose le signal en hyperfréquence et l'amplifie. Il lui correspond un récepteur qui amplifie et égalise le signal reçu, le transpose en fréquence intermédiaire. L'émetteur et les récepteurs sont reliés aux antennes par des guides d'ondes, et des câbles RF. L'antenne a un rôle très important dans les liaisons hertziennes : elle assure l'interface entre le circuit électrique et le milieu de propagation.

Dans les stations relais, le signal peut être amplifié en fréquence intermédiaire sans retour en bande de base. Une transposition de fréquence permet alors de passer de la fréquence reçue à la fréquence FI puis une autre de la FI à la fréquence réémise.

Un satellite est organisé de la même façon qu'un relais intermédiaire [10].

I.8.1 Les antennes

I.8.1.1 Définition

L'antenne permet d'établir une liaison radio depuis un émetteur vers un récepteur. En émission, elle permet de transformer le signal électrique en une onde électromagnétique. En réception, c'est l'inverse.

I.8.1.2 Paramètres caractéristiques d'une antenne

Une antenne peut être caractérisée par plusieurs paramètres fondamentaux. Les principaux sont :

- le diagramme de rayonnement.
- la directivité.
- le gain.
- Le rendement.
- la polarisation.

- **Le diagramme de rayonnement**

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale [11].

- **Directivité, gain et rendement d'une antenne**

Ces 3 grandeurs permettent de caractériser la façon dont une antenne convertit la puissance électrique incidente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière. Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d'une antenne par rapport à l'antenne de référence qu'est l'antenne isotrope [12].

➤ **La directivité**

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [12].

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad (\text{I.1})$$

➤ **Le gain**

Le gain d'une antenne est le facteur le plus important.

C'est le rapport entre la puissance rayonnée dans le lobe principal et la puissance rayonnée par une antenne de référence, isotrope ou dipolaire. Le gain d'une antenne dépend principalement de sa surface équivalente, de sa directivité et de la fréquence.

On exprime généralement le gain d'une antenne en décibels, soit par rapport au dipôle, soit par rapport à l'antenne isotrope.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_E} \quad (\text{I.2})$$

➤ **Le rendement**

C'est le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie.

$$P_R = \eta * P_E \longrightarrow G = \eta * D \quad (\text{I.3})$$

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_E sous forme de puissance rayonnée P_R [12].

- **La polarisation**

La polarisation définit le sens dans lequel l'antenne émet les ondes.

Les ondes sont émises parallèlement au sol lorsqu'il s'agit de la polarisation verticale, et perpendiculairement (90°) au sol lorsqu'il s'agit de la polarisation horizontale [11].

I.8.1.3 Les types d'antennes

Une antenne peut émettre dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une direction définie (antenne sectorielle ou directionnelle). Le type d'antenne influence directement sur la géométrie du signal, c'est à dire sur sa zone d'émission. Indépendamment de son gain, il détermine la portée en concentrant ou non les ondes. Le choix du type d'antenne est déterminant en fonction des besoins [13]:

- **Dipôle demi-onde**

Le dipôle demi-onde, communément appelé « doublet », est un doublet de hertz dont la longueur est théoriquement égale à la moitié de la longueur d'onde ($\frac{1}{2}\lambda$) du signal à émettre ou à recevoir.

L'antenne est alimentée en son centre, là où l'impédance est proche de 75ohm, par une ligne symétrique ou un câble coaxial [14].

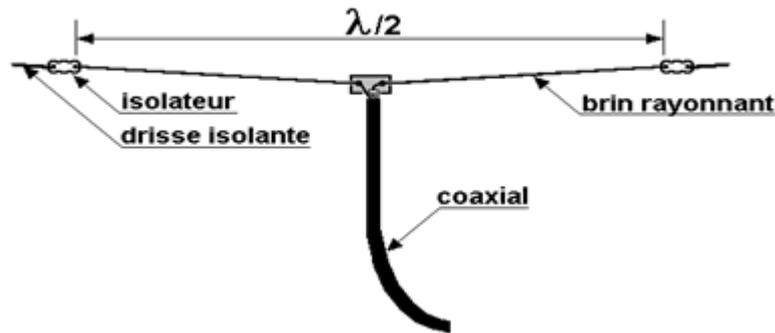


Figure I.5 L'antenne demi-onde

- **Antenne Yagi**

L'antenne Yagi est une antenne directive dont le gain est supérieur à celui du dipôle dans la direction avant et inférieur dans la direction arrière. Elle se compose de :

- Un dipôle demi-onde, alimenté comme il s'en son milieu, c'est l'élément radiateur.
- Un ou plusieurs éléments réflecteurs, non alimenté.
- Un ou plusieurs éléments directeurs, non alimenté

Les éléments non alimentés sont qualifiés de 'parasites' la configuration minimum pour une antenne Yagi correspond à un dipôle accompagné d'un seul élément parasite, un réflecteur (le plus souvent) ou un directeur. La structure de l'antenne Yagi est montrée dans la figure [15]:

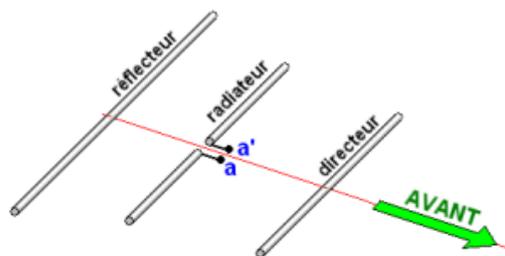


Figure I.6 La structure de l'antenne Yagi

- **Antenne à cornet**

C'est une antenne qui a la forme d'un cône, d'une pyramide ou d'un cylindre est constituée de gauche à droite :

- de la partie « raccord » avec le guide d'onde et la source appelée « flange » ou « bride » en français.
- puis une partie guide d'onde (ou pas).
- Et du cornet proprement dit [16].

- **Antenne parabolique**

Une antenne parabolique, communément appelée parabole, est une antenne disposant d'un réflecteur paraboloidal, basé sur les propriétés géométriques de la courbe nommée parabole et de la surface nommée parabololoïde de révolution.

Cette antenne, qualifiée d'universelle puisqu'elle fonctionne en théorie sur n'importe quelle fréquence ou longueur d'onde, est cependant seulement employée à partir de la bande L dès 1,1 GHz et lorsqu'un gain d'antenne élevé est recherché [17].

I.9 Communication par satellite

Un satellite artificiel est un engin construit par l'homme et placé en orbite autour d'un astre, en particulier de la Terre, par un système de transport spatial. Les satellites artificiels sont devenus des outils indispensables pour la science, la défense, les télécommunications et pour des applications aussi variées que la prévision du temps, la lutte contre la pollution ou le sauvetage de navigateurs en détresse [18].

I.9.1 Constitution d'un satellite

Un satellite de télécommunications se décompose en deux parties :

- La charge utile qui sert de relais de communication entre stations terriennes. Elle comprend deux sous-systèmes : les antennes et les répéteurs.
- La plate-forme, qui intègre les moyens logistiques indispensables à la mise en œuvre correcte de la charge utile. Il s'agit des sous-systèmes de propulsion, de contrôle d'attitude et d'orbite, d'alimentation électrique, de contrôle thermique, de télécommande et de télémessure [19].

I.9.2 Constitution générale d'une liaison par satellite

Toute liaison satellite se décompose en deux parties :

- la liaison montante «Uplink », c'est-à-dire le transfert du signal depuis la station émettrice terrienne vers le satellite (terre / satellite).
- la liaison descendante « Downlink », c'est-à-dire le transfert du signal du satellite jusqu'à la station réceptrice terrienne (satellite /terre), nous avons donc deux bilans de liaisons distincts (bilan de liaison en voie montante et bilan de liaison en voie ascendante) [20].

La figure ci-dessous illustre un schéma général d'une liaison satellitaire.

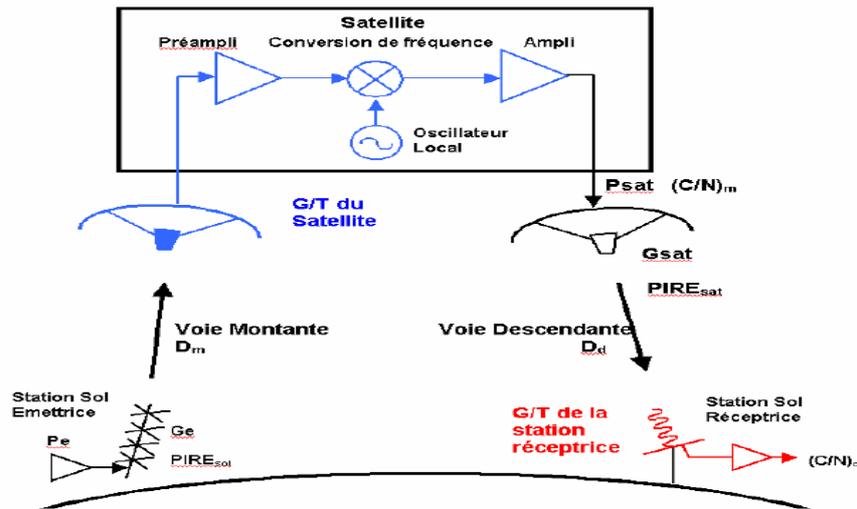


Figure I.7 Synoptique d'une liaison via satellite

Chaque trajet exploite un couple de fréquences différentes sur le principe du duplex [21].
Ecart duplex :

- ✓ [F1-F2]
- ✓ [F3-F4]

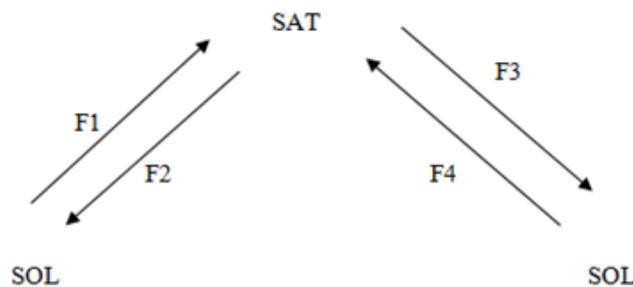


Figure I.8 Liaison satellitaire mode duplex

Il s'agit d'un duplex avec relais, il est possible de réduire le nombre de paires de fréquences. On fait alors le cas particulier $F1 = F4$ et $F2 = F3$, utilisé par les faisceaux hertziens terrestres. Le relais émet des deux coté sur une seule fréquence $F2$ et reçoit sur une seule fréquence $F1$.

Dans le cas le plus simple, (mode simplex) la diffusion vers une grande zone et un nombre illimité de terminaux (diffusion de télévision), exploite pour chaque trajet une seule fréquence [21].

Exemple Ku : F1~14 à 15 GHz.
F2~11 à 12 GHz

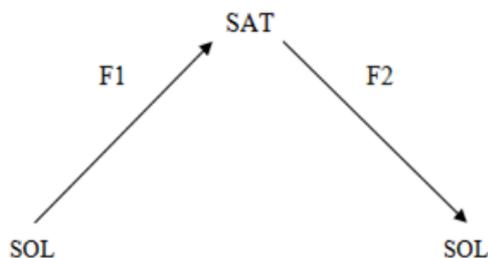


Figure I.9 Liaison satellitaire mode simplex

La station sol envoie l'information sous forme d'un signal de forte puissance, à très haute fréquence (bande GHz) au satellite qui la reçoit et la retransmet vers les stations Terre se trouvant dans sa zone de couverture [21].

I.9.3 Services offerts par satellite

Divers acteurs ont bouleversé le marché des télécommunications satellitaires ces dernières années : la demande importante de besoins, les services multicast, c'est-à-dire d'une source vers un groupe déterminé d'utilisateurs et apparue.

La carte de répartition des services entre réseaux satellites et réseaux terrestres est donc en train de changer radicalement. D'une manière synthétique, les avantages des satellites sont:

- Le recouvrement de grandes zones géographiques
- La possibilité d'avoir des accès et des destinations multiples pour une même communication
- La possibilité de déploiement rapide des services
- L'adaptation à des régions sans infrastructure de télécommunications [22].

I.9.4 EXEMPLES D'APPLICATIONS

I.9.4.1 Orbite terrestre basse (LEO)

LEO (Low Earth Orbit): orbite basse située entre 180 et 400 km environ, souvent plus ou moins circulaire avec une inclinaison par rapport à l'équateur suivant la mission du satellite. Une orbite basse qui a une inclinaison qui lui permet un survol des régions proches des pôles est appelée orbite polaire [23].

- **Satellite Alsat-1N**

Alsatsat-1N a été lancé et mis en orbite le 26/09/2016 à bord du lanceur PSLV C-35 depuis le site de lancement de Sriharikota en Inde avec les deux autres satellites Algériens Alsatsat-1B et Alsatsat- 2B.

Depuis son lancement, Alsat-1N est entièrement commandé et supervisé par les opérateurs du centre de développement des satellites (CDS).

Ces opérations ont permis de tester la bonne santé du satellite et des charges utiles en orbite et collecter des centaines de télémesures.

La station sol est capable de communiquer avec le satellite Alsat-1N sur les bandes de fréquence UHF/VHF.

Alsat-1N est un nano-satellite de type Cubesat 3U mesurant 30cm X 10cm X 10cm, pesant 3.5Kg, et évoluant sur orbite polaire à 670 Km d'altitude [24].

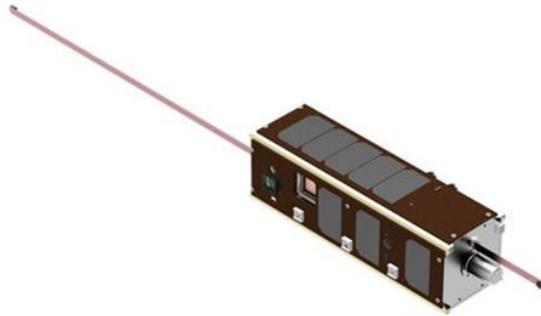


Figure I.10 Alsat-1N avec ses antennes déployées

I.9.4.2 Orbite terrestre moyenne (MEO)

L'orbite terrestre moyenne, communément appelée orbite circulaire intermédiaire ou MEO (Medium Earth Orbit en anglais), est une orbite autour de la Terre située entre 2 000 et 35 786 kilomètres d'altitude, soit au-dessus de l'orbite terrestre basse et en dessous de l'orbite géostationnaire.

Cette orbite est utilisée pour placer des satellites de navigation tels ceux de Glonass (à une altitude de 19 100 kilomètres), du GPS (à une altitude de 20 200 kilomètres) et de Galileo (à une altitude de 23 222 kilomètres). On y a lancé également Telstar 1, un satellite de communication. [23].

I.9.4.3 Orbite Terrestre Géostationnaire (GEO)

GEO (Geostationary Earth Orbit) est une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur à une altitude de 35 786 km du sol, le rayon de l'orbite est de 42164 km.

A cette altitude la période de révolution du satellite correspondant exactement à la période de rotation de la terre, soit 23heurs ,56minutes et 4 secondes.

Vue de la terre, un satellite géostationnaire semble immobile dans le ciel. C'est l'orbite parfait pour les satellites de communications pour certain satellites d'observation (météo) qui doivent couvrir une zone fixe [23].

➤ Orbite polaire

Est une orbite circulaire basse à une altitude généralement assez basse (par convention de 300 à 1000 Km d'altitude).

Un satellite en orbite polaire survole les pôles à chaque révolution avec une inclinaison proche de 90° , il survole la quasi-totalité de la Terre et est de ce fait très intéressant pour les missions d'observation. Ces orbites sont généralement des orbites héliosynchrones [25]

➤ Orbite synchrone solaire

L'orbite héliosynchrone est une orbite circulaire située entre 400 et 900 km passant d'un pôle à l'autre. Sa particularité est que le satellite héliosynchrone passe toujours à la même heure solaire au-dessus d'un même point. Le plan de l'orbite conserve toujours la même orientation par rapport au Soleil. Cette orbite est d'un grand intérêt pour l'observation de la Terre : elle permet d'observer une même région dans des conditions d'éclairement similaires à chaque passage. La figure suivante illustre la forme d'orbite synchrone solaire [25].

I.10 Aperçue sur le logiciel Bilan-TSat

I.10.1 Présentation de l'interface

Le logiciel Bilan-TSat a été réalisé au cours de ce travail de Master sous l'outil de programmation Matlab. Ce dernier permet de réaliser des interfaces graphiques (GUI : Graphical User Interface) en disposant à l'aide de la souris des éléments graphiques (boutons, images, champs de texte, menu déroulants,...). Le logiciel Bilan-TSat permet de calculer le bilan de liaison soit terrestre ou satellitaire.



Figure I.11 Logo Matlab

Après avoir lancé l'application, une boîte de dialogue va apparaître à l'écran (figure I.12) pour choisir entre un cas terrestre ou un cas satellitaire.



Figure I.12 Boite de dialogue

L'organigramme de notre application Bilan-TSat est donné dans la figure I .13:

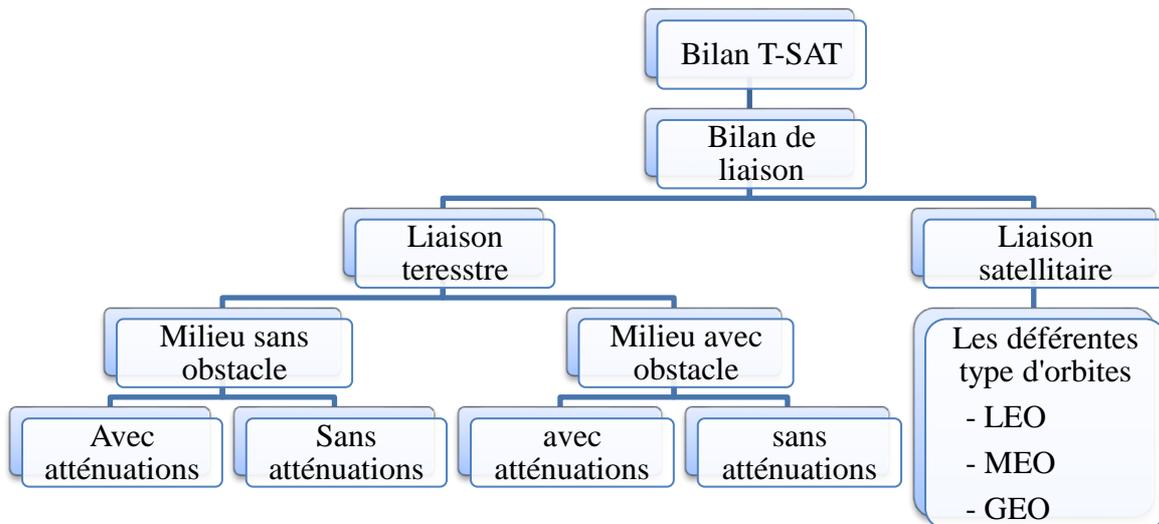


Figure I.13 Organigramme générale de l'application

Cette organigramme montre bien les différentes étapes de notre application. Bilan T-Sat permet de calculer le bilan de liaison de deux cas différents :

- Liaison terrestre.
- Liaison satellitaire.

Dans le premier cas (liaison terrestre), deux situations sont possibles.

- Cas de milieu sans obstacle.
- Cas de milieu avec obstacle.

Pour chaque cas on peut soit ajouter ou supprimer des atténuations.

Et pour le cas de liaison satellitaire, l'étude est réalisée selon l'orbite du satellite : LEO, MEO ou encore l'orbite GEO.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous commençons par une introduction et un bref historique sur la transmission d'information, puis nous avons donné une étude générale sur la transmission par faisceau hertzien FH.

Ensuite, nous avons présenté la transmission par onde radioélectrique, partie dans laquelle le principe d'émission et réception des signaux par les antennes a été élucidé. Enfin, nous avons donné les principes de fonctionnement et les différents cas d'antennes.

Nous n'avons pu aborder l'essentiel de notre travail, sans auparavant relater les télécommunications par satellite ou nous avons donné la structure générale du satellite avec la liaison satellitaire, et les différents cas d'orbites avec un exemple concernant le satellite Algérien Alsat-1N. Et nous avons terminé ce chapitre par une présentation de notre logiciel Bilan-TSat.

CHAPITRE II
L'ATTENUATION
SUR LE BILAN DE
LIAISON

II.1 Introduction

Dans une liaison radioélectrique entre un émetteur et un récepteur le rapport de la puissance fournie par l'émetteur à la puissance disponible à l'entrée du récepteur dépend de plusieurs facteurs tels que les pertes dans les antennes ou dans les lignes de transmission qui les alimentent, l'affaiblissement dû aux divers mécanismes de propagation, les pertes dues à une mauvaise adaptation des impédances ou de la polarisation, etc.

Donc il est souhaitable de normaliser la terminologie et les notations employées pour caractériser l'affaiblissement de transmission et les composantes de cet affaiblissement [26].

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents cas d'atténuations dans une liaison.

II.2 Définition d'une atténuation

L'atténuation ou affaiblissement est la diminution relative de la puissance d'un signal au cours de sa transmission, que ce soit dans les lignes de transmission ou dans la transmission hertzienne, est une grandeur importante dans les télécommunications [27].

II.3 Affaiblissement de signal à la végétation

Lorsque les antennes sont entourées d'une végétation modérément dense, des pertes s'ajoutent car les signaux doivent passer aux travers. C'est ce genre de pertes contenues. A cause de sa distribution particulière (la végétation n'est pas un milieu homogène), le calcul de l'atténuation produite ne se fait pas par le biais de la constante d'atténuation liée aux paramètres électriques du matériau [28].

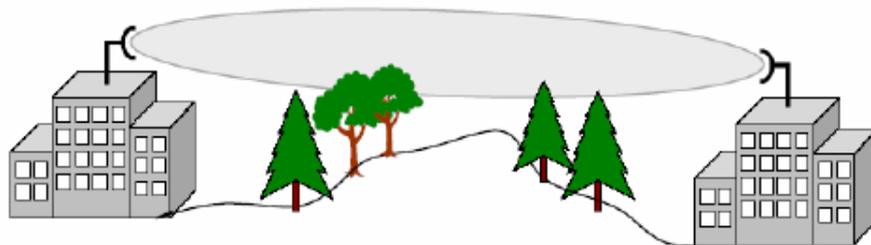


Figure II.1 Affaiblissement de signal à la végétation

Atténuation provoquée par un arbre [29]:

$$L_{veg} \text{ [dB]} = 12.01 + 7.46 \log (f_{GHz}) \quad (\text{II.1})$$

Atténuation par mètre [29] :

$$L_{veg} \text{ [dB/m]} = 0.54 + 1.4 \log (f_{GHz}) \quad (\text{II.2})$$

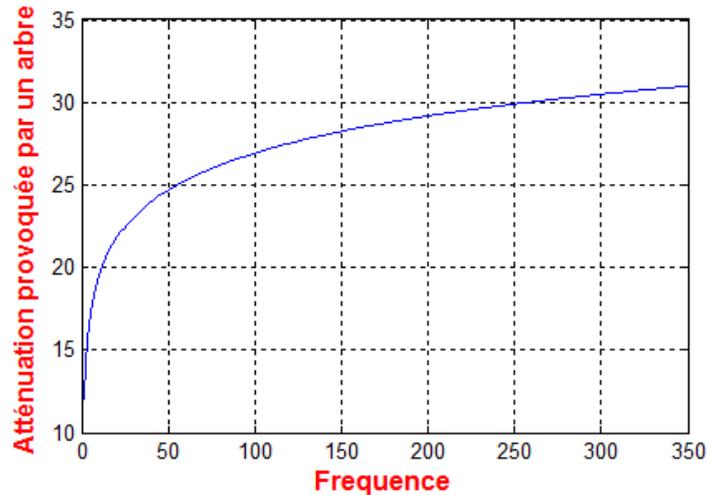


Figure II.2 Simulation « Atténuation provoquée par un arbre »

II.4 Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère

Le gaz de l'atmosphère a des fréquences de résonances moléculaires à lesquelles ils absorbent une partie appréciable de l'énergie incidente. Les relais d'absorption les plus importantes sont celles de l'oxygène et de la vapeur d'eau, l'azote n'ayant aucune raie d'absorption dans la bande de fréquence radio [28].

L'affaiblissement le long d'un trajet de longueur d (km) est [30]:

$$A_a = \gamma_a d \tag{II.3}$$

γ_a : L'affaiblissement linéique en (dB/km).

La figure 1 montre l'atténuation linéique α_{gaz} provoqué par l'oxygène et la vapeur d'eau.

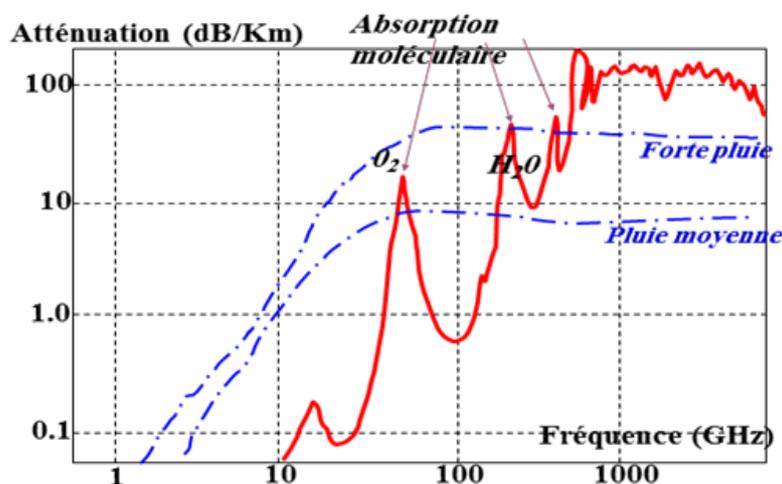


Figure II.3 Atténuation linéique des gaz de l'atmosphère p : 1013.6 mbar ; T=20° ; Vapeur d'eau =7.5 g/m3 [30]

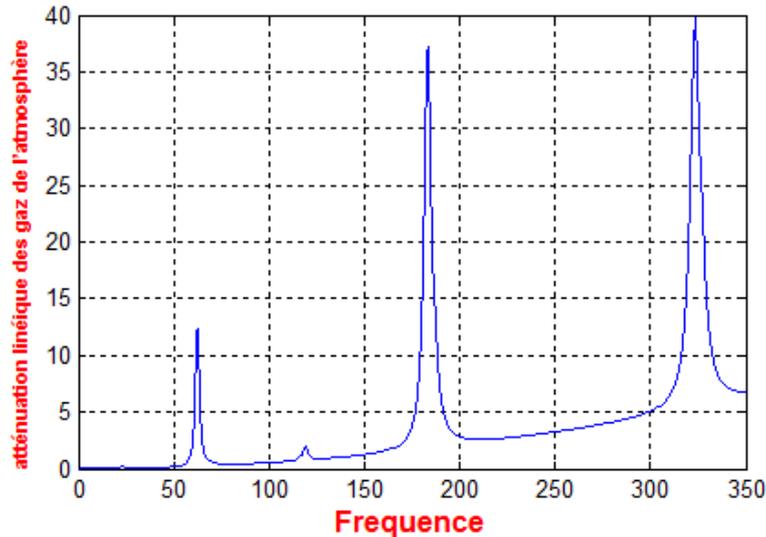


Figure II.4 Simulation Matlab « gaz de l'atmosphère »

Des approximations semi-empiriques dues à Van Vleck et Weisskopf donnent à 20° C [28]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha_{O_2} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \left(\frac{6.6}{f^2 + 0.33} + \frac{9.8}{(f - 57.5)^2 + 2.2} \right) f^2 * 10^{-3} & f < 60 \\ \alpha_{O_2} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \left(\frac{4.13}{(f-62.5)^2 + 1.1} + \frac{9.8}{(f-18.7)^2 + 2} \right) f^2 * 10^{-3} & 60 < f < 350 \end{array} \right. \quad \text{(II.4.1)}$$

Et

$$\alpha_{H_2O} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \left(0.067 + \frac{2.4}{(f - 22.3)^2 + 6.6} + \frac{7.33}{(f - 183.5)^2 + 5} + \frac{4.4}{(f - 323.8)^2 + 10} \right) * \rho \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] * f^2 [\text{GHz}] * 10^{-3} \quad \text{(II.4.2)}$$

- Où ρ est la densité de vapeur d'eau.

Dans l'équation (II.4.2) il ne faut prendre que les deux premiers termes lorsque la fréquence est en dessous de 100 GHz.

Il semble évident que communiquer en ordre hertzienne à 60 GHz tient de l'incompétence car les pertes d'absorption par l'oxygène seraient alors énormes. Par contre, on pourrait facilement mesurer le taux d'humidité (vapeur d'eau) on opérant à 22GHz avec un radar météo.

II.4.1 Affaiblissement linéique

Pour une évaluation rapide et approchée de l'affaiblissement linéique à des fréquences allant jusqu'à 350 GHz dans les cas ne nécessitant pas une grande précision on pourra utiliser des algorithmes simplifiés [31].

L'affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère est donné par la formule [31] :

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 f N''(f) \quad [\text{dB/km}] \quad (\text{II.5.1})$$

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f \left(N''_{\text{Oxygen}}(f) + N''_{\text{WaterVapour}}(f) \right) [\text{dB/km}] \quad (\text{II.5.2})$$

Où γ_o et γ_w sont les affaiblissements linéiques (dB/km) dus respectivement à l'air sec (affaiblissement par l'oxygène, affaiblissement induit par la pression de l'azote et absorption de Debye non résonante) et à la vapeur d'eau et où f est la fréquence (GHz) et $N''(f)$ est la partie imaginaire du coïncide complexe, fonction de la fréquence [31] :

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad [31] \quad (\text{II.6})$$

- S_i est le coefficient d'amplitude de la i ème raie.
- F_i est son facteur de forme et la somme porte sur toutes les raies, la somme devrait commencer à $i = 38$ et non à $i = 1$, $N''_D(f)$ Est la contribution du spectre continu de l'air sec due à l'absorption induite par la pression de l'azote et au spectre de Debye.

Le coefficient d'amplitude de la raie est donné par [31]:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2 (1 - \theta)] && \text{pour l'oxygène} \\ &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp [b_2 (1 - \theta)] && \text{pour la vapeur d'eau} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Où:

p : pression de l'air sec (hPa).

e : pression partielle de la vapeur d'eau (hPa) (la pression barométrique totale étant $p_{\text{tot}} = p + e$)

$\theta = 300/T$.

T : température (K)

a₁ et **a₂** : des coefficients pour l'oxygène.

b₁ et **b₂** : des coefficients pour la vapeur d'eau.

II.4.2 Evaluation approchée de l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère dans la gamme de fréquences 1-350 GHz

II.4.2.1 Affaiblissement linéique

On peut évaluer l'affaiblissement linéique dû à l'air sec et à la vapeur d'eau, depuis le niveau de la mer jusqu'à une altitude de 10 km, au moyen des algorithmes simplifiés ci-après, qui sont fondés sur un ajustement des courbes fournies par le calcul par sommation des contributions des raies d'absorption et qui donnent des résultats dont la différence avec les résultats des calculs plus précis vaut environ $\pm 10\%$ en moyenne aux fréquences éloignées des centres des principales raies d'absorption. La différence absolue entre les résultats de ces

algorithmes et ceux de la méthode de sommation des contributions des raies d'absorption est généralement inférieure à 0,1 dB/km et atteint un maximum de 0,7 dB/km au voisinage de 60 GHz. Pour les altitudes supérieures à 10 km et dans les cas nécessitant une plus grande précision, il convient d'utiliser la méthode de sommation des contributions des raies d'absorption [32].

Pour l'air sec, l'affaiblissement γ_o (dB/km) est donné par les formules suivantes [5] :

$$\gamma_o = \left[\frac{7,2 r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,62 \xi_3}{(54 - f)^{1,16\xi_1} + 0,83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (\text{II.8})$$

Pour $f \leq 54$ GHz:

Et :

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f - 58)(f - 60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f - 54)(f - 60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f - 54)(f - 58) \right] \quad (\text{II.9})$$

Pour $54 \text{ GHz} < f \leq 60 \text{ GHz}$:

Encor :

$$\gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f - 60}{2} \quad (\text{II.10})$$

Pour $60 \text{ GHz} < f \leq 62 \text{ GHz}$:

Et :

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f - 64)(f - 66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f - 62)(f - 66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f - 62)(f - 64) \right] \quad (\text{II.11})$$

Pour $62 \text{ GHz} < f \leq 66 \text{ GHz}$:

$$\gamma_o = \left\{ 3,02 \times 10^{-4} r_t^{3,5} + \frac{0,283 r_t^{3,8}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,502 \xi_6 [1 - 0,0163 \xi_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1,4346 \xi_4} + 1,15 \xi_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (\text{II.12})$$

Pour $66 \text{ GHz} < f \leq 120 \text{ GHz}$

Finalement :

$$\gamma_o = \left[\frac{3,02 \times 10^{-4}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} + \frac{0,283 r_t^{0,3}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3,5} \times 10^{-3} + \delta \quad (\text{II.13})$$

Pour $120 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz}$:

Où:

f :fréquence (GHz).

r_p =p_{tot}/1013, où p_{tot} représente la pression totale de l'air .

r_t =288 / (273 + t).

p :pression (hPa).

t :température (°C).

Pour la vapeur d'eau, l'affaiblissement γ_w (dB/km) est donné par

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3,98\eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11,96\eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,31)^2 + 11,14\eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0,081\eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp[1,6(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} \\ & + \frac{25,37\eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17,4\eta_1 \exp[1,46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0,41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & \left. + \frac{8,3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2,5} \rho \times 10^{-4} \end{aligned} \quad \text{(II.14)}$$

Avec:

$$\eta_1 = 0,955r_p r_t^{0,68} + 0,006\rho \quad \text{(II.15.1)}$$

$$\eta_2 = 0,735r_p r_t^{0,5} + 0,0353r_t^4 \rho \quad \text{(II.15.2)}$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad \text{(II.15.3)}$$

Où ρ est la concentration en vapeur d'eau (g/m³) [32].

II.4.3 Affaiblissement sur un trajet

II.4.3.1 Trajets terrestres

Dans le cas d'un trajet horizontal ou d'un trajet légèrement incliné proche du sol, l'affaiblissement sur ce trajet A peut s'écrire [31] :

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{(dB)} \quad \text{(II.16)}$$

Où r_0 est la longueur du trajet (km) [31].

II.4.3.2 Trajets obliques

L'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère le long de trajets obliques à travers l'atmosphère terrestre, ils sont fondés sur la définition d'une hauteur équivalente par laquelle on peut multiplier l'affaiblissement linéique calculé pour obtenir l'affaiblissement sur le trajet.

Pour des altitudes supérieures à 10 km et en particulier, pour des fréquences situées à moins de 0,5 GHz des fréquences centrales des raies de résonance à toute altitude.

Les formules ci-dessous ont été obtenues à partir des valeurs de l'affaiblissement dans la direction du zénith [31] :

$$h_o = \frac{6,1}{1 + 0,17r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad (\text{II.17.1})$$

Où:

$$t_1 = \frac{4,64}{1 + 0,066 r_p^{-2,3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59,7}{2,87 + 12,4 \exp(-7,9 r_p)} \right)^2 \right] \quad (\text{II.17.2})$$

$$t_2 = \frac{0,14 \exp(2,12 r_p)}{(f - 118,75)^2 + 0,031 \exp(2,2 r_p)} \quad (\text{II.17.3})$$

$$t_3 = \frac{0,0114}{1 + 0,14 r_p^{-2,6}} f \frac{-0,0247 + 0,0001f + 1,61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0,0169f + 4,1 \times 10^{-5} f^2 + 3,2 \times 10^{-7} f^3} \quad (\text{II.17.4})$$

Moyennant la contrainte suivante:

$$h_o \leq 10,7 r_p^{0,3} \text{ lorsque } f < 70 \text{ GHz} \quad (\text{II.17.5})$$

Et pour la vapeur d'eau, la hauteur équivalente est [31]:

$$h_w = 1,66 \left(1 + \frac{1,39\sigma_w}{(f - 22,235)^2 + 2,56\sigma_w} + \frac{3,37\sigma_w}{(f - 183,31)^2 + 4,69\sigma_w} + \frac{1,58\sigma_w}{(f - 325,1)^2 + 2,89\sigma_w} \right) \quad (\text{II.18.1})$$

pour $f \leq 350$ GHz

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6(r_p - 0,57)]} \quad (\text{II.18.2})$$

L'affaiblissement en direction du zénith entre 50 et 70 GHz est une fonction compliquée de la fréquence, et les algorithmes ci-dessus pour une hauteur équivalente ne permettent, en général, qu'un calcul approximatif des niveaux minimums d'affaiblissement susceptibles d'être trouvés dans cette gamme de fréquences.

L'affaiblissement total dans la direction du zénith est alors [31]:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad (\text{dB}) \quad (\text{II.19})$$

II.4.3.3 Trajets inclinés

- **Angles d'élévation compris entre 5° et 90°**

Pour déterminer les valeurs de l'affaiblissement sur un trajet incliné entre une station située à l'altitude h_1 et une autre station située à une altitude supérieure h_2 , lorsque les deux altitudes sont inférieures à 10 km au-dessus du niveau moyen de la mer, il convient de remplacer dans l'équation (19) les valeurs h_o et h_w respectivement par les valeurs h'_o et h'_w suivantes [31] :

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad (\text{km}) \quad (\text{II.22.1})$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad (\text{Km})$$

(II.22.2)

- **Angles d'élévation compris entre 0° et 5°**

L'affaiblissement sur un trajet incliné entre une station située à une altitude h_1 et une altitude supérieure h_2 (lorsque les deux altitudes sont inférieures à 10 km au-dessus du niveau moyen de la mer), peut être déterminé au moyen de l'équation suivante [32]:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad (\text{dB}) \quad (\text{II.23})$$

Où:

R_e : rayon équivalent de la terre comprenant la réfraction ,exprimé en Km(une valeur de 8500Km est généralement acceptable dans le voisinage immédiat de la surface de la Terre).

φ_1 : angle d'élévation à l'altitude h_1 .

F : fonction définie par:

$$F(x) = \frac{1}{0,661 x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (\text{II.24.1})$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right) \quad (\text{II.24.2})$$

$$x_i = \text{tg } \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (\text{II.24.3})$$

$$x'_i = \text{tg } \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (\text{II.24.4})$$

II.5 Hydrométéores

Les hydrométéores regroupes toutes les particules d'eau présentes dans l'atmosphère. Ces particules, selon leur taille par rapport à la longueur d'onde, affecte différemment les ondes électromagnétiques. On considéré principalement comme hydrométéores: les nuages, la brume, le brouillard, la pluie et la neige [28].

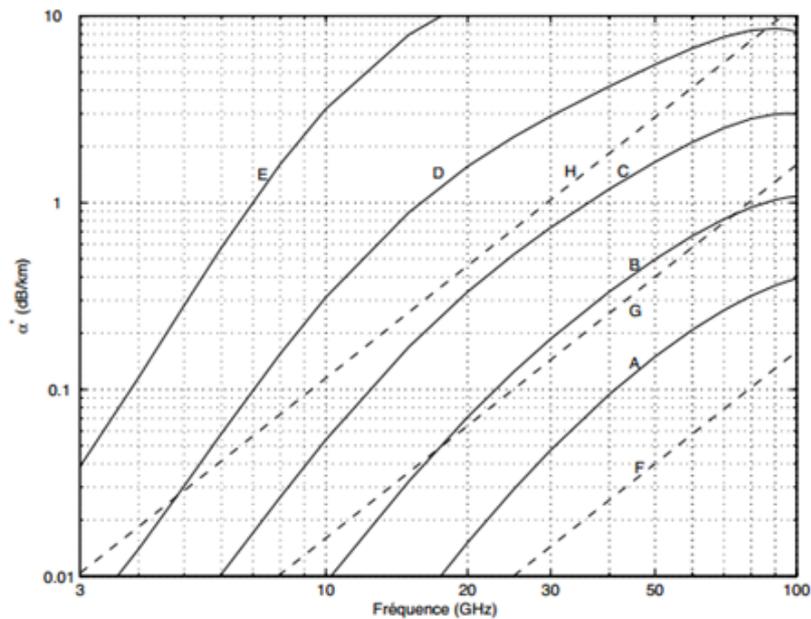


Figure II.5 Atténuation linéique des hydrométéores

Affaiblissement par une pluie de :

- A : 0.25 mm/hre (bruins)
- B : 1.0 mm/hre (pluie fine)
- C : 4.0 mm/hre (pluie)
- D : 16 mm/hre (pluie forte)
- E : 100 mm/hre (pluie torrentielle)

Affaiblissement par le brouillard de :

- F : 0.032 g/m³ (visibilité de plus de 600 m)
- G : 0.32 g/m³ (visibilité de 120 m)
- H : 2.3 g/m³ (visibilité de 30 m).

Tant que les gouttes ont un diamètre bien inférieur à la longueur d'onde (c'est le cas des nuages, de la brume, du brouillard et d'une pluie très fine), l'atténuation linéique est fonction de la fréquence et proportionnelle à la quantité d'eau par unité de volume i.e. g/m³. Une approximation valable entre 2 et 50 GHz et une température entre -10 et 25°. Est [28]:

$$\alpha_{h_1} \left[\frac{dB}{km} \right] = \left(1 - \frac{T}{40} \right) * \rho * f^2 * 10^{-3} \tag{II.25}$$

La pluie est un cas plus pathétique (sous-entendre compliqué). Les paramètres qui entrent en jeu sont multiples : distribution de la tailles et forme des gouttes, répartition spatiale des gouttes dans la cellule de pluie, déplacement temporelle de la cellule de pluie, etc.

La figure II.5 montre l'atténuation linéique des hydrométéores, dont celle causée par la pluie selon l'intensité. Pour obtenir ces courbes, nous avons utilisé une formulation empirique du type [28].

$$\alpha_{h_1} \left[\frac{dB}{km} \right] = kR^a \tag{II.26.1}$$

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad [33] \tag{II.26.2}$$

$$a = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_a \log_{10} f + c_a \quad [33] \tag{II.26.3}$$

$f [GHz]$	k_h	k_v	a_h	a_v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824

Tableau II.1 Coefficients k et a avec modèle de Laws et Parsons

Où R correspond au taux de précipitation en mm/heure. Les deux coefficients k et a, fonction de la fréquence et de la polarisation, dépendent de la distribution des diamètres des gouttes de pluie. Souvent, c'est le modèle de Laws et Parsons qui est employé. Le tableau II.1 donne quelques valeurs.

Finalement, la neige a un effet quasi négligeable sur l'affaiblissement des ondes électromagnétiques. Cependant, les cristaux dépolarisent les ondes [28].

II.5.1 Affaiblissement de signal à la pluie, nuage et aux brouillards

II.5.1.1 Pluie

La pluie est le phénomène le plus perturbant du point de vue de la propagation. Les gouttes d'eau sont en général considérées comme sphériques et leurs dimensions peuvent atteindre un diamètre de 2 mm. Elles ont pour effet d'atténuer, de diffuser et d'altérer la polarisation des ondes.

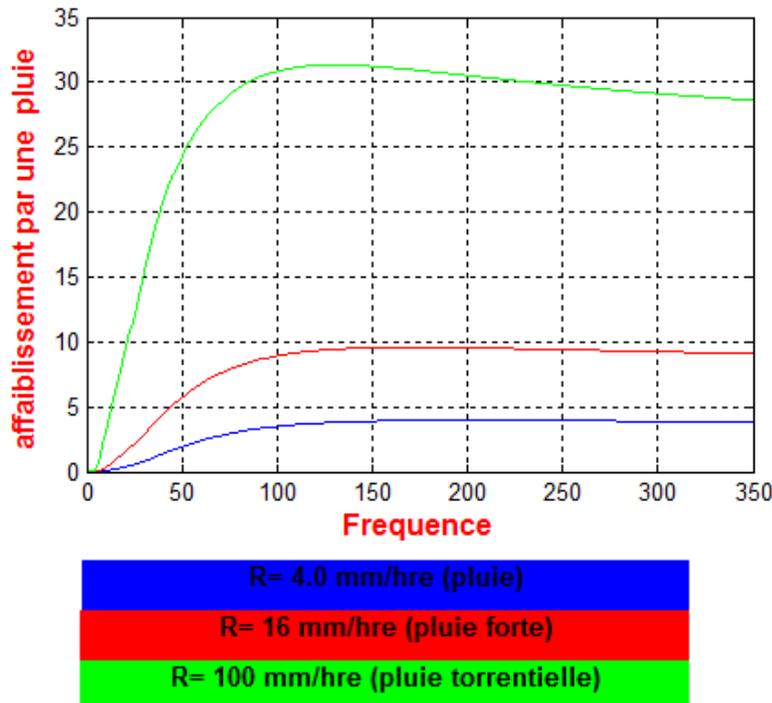


Figure II.6 Affaiblissement du à la pluie à l'aide de simulateur Matlab

La pluie est décrite au moyen de la distribution des tailles des gouttes. On utilise en général la distribution de Marshall et Palmer [34].

$$N(r) = N_0 * e^{-\alpha r} \tag{II.27}$$

$N(r)dr$ représente le nombre de gouttes d'eau par unité de volume dont le rayon est compris entre r et $r+dr$. N_0 est une constante expérimentale exprimée en $m^{-3} mm^{-1}$ et α est une constante en mm^{-1} .

On prend en général :
 $N_0 = 16.10^3 m^{-3} mm^{-1}$

Et $\alpha = 8.2 R^{-0.21} mm^{-1}$

R représente l'intensité de pluie exprimé en mm/heure.

Pour des fréquences entre 30 MHz et 1000 GHz et pour des températures de -4°C à $+30^{\circ}\text{C}$, la permittivité relative de la pluie en fonction de la fréquence f s'écrit [34] :

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \frac{\epsilon_0 - \epsilon_r}{f - if_p} f + \frac{\epsilon_p - \epsilon_s}{f - if_s} f \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$\epsilon_0 = 77.6 + 103.3\theta, \quad \epsilon_p = 5.48, \quad \epsilon_s = 3.51.$$

$$f_p = 20.09 - 1420 + 294\theta^2.$$

$$f_s = 5900 - 1500\theta.$$

$$\theta = \frac{300}{273.15 + T} - 1.$$

T : Température en $^{\circ}\text{C}$.

L'atténuation subie par une onde traversant un rideau de pluie homogène est proportionnelle à la distance de parcourue et peut-être caractérisée par une atténuation linéique. Il a été montré par des calculs approchés que l'atténuation linéique γ en dB/km pouvait s'écrire en fonction de l'intensité de pluie R en mm/h par la relation:

$$\gamma = a * R^b \quad (\text{II.29})$$

Les coefficients a et b dépendent de la fréquence et de polarisation.

II.5. 1.2 Nuages ou de brouillard

Dans le cas de nuages ou de brouillard composés entièrement de gouttelettes minuscules, d'un diamètre généralement inférieur à 0,01cm, l'approximation de Rayleigh est valable pour les fréquences inférieures à 200GHz, et l'on peut exprimer l'affaiblissement en fonction du contenu total en eau par unité de volume. L'affaiblissement linéique dans de tels nuages ou un tel brouillard s'exprime alors par la formule [30]:

$$\gamma_c = K_1 * M \quad (\text{dB/km}) \quad (\text{II.30})$$

Où:

- γ_c : affaiblissement linéique (dB/km) à l'intérieur du nuage.
- K_1 : affaiblissement linéique spécifique ((dB/km)/(g/m³))
- M : concentration en eau liquide dans les nuages ou le brouillard (g/m³).

Aux fréquences de l'ordre de 100 GHz et aux fréquences supérieures l'affaiblissement par le brouillard peut devenir important. La concentration en eau liquide dans le brouillard est en général égale à environ 0,05 g/m³ pour un brouillard modéré (visibilité de l'ordre de 300 m) et de 0,5 g/m³ pour un brouillard épais (visibilité de l'ordre de 50 m).

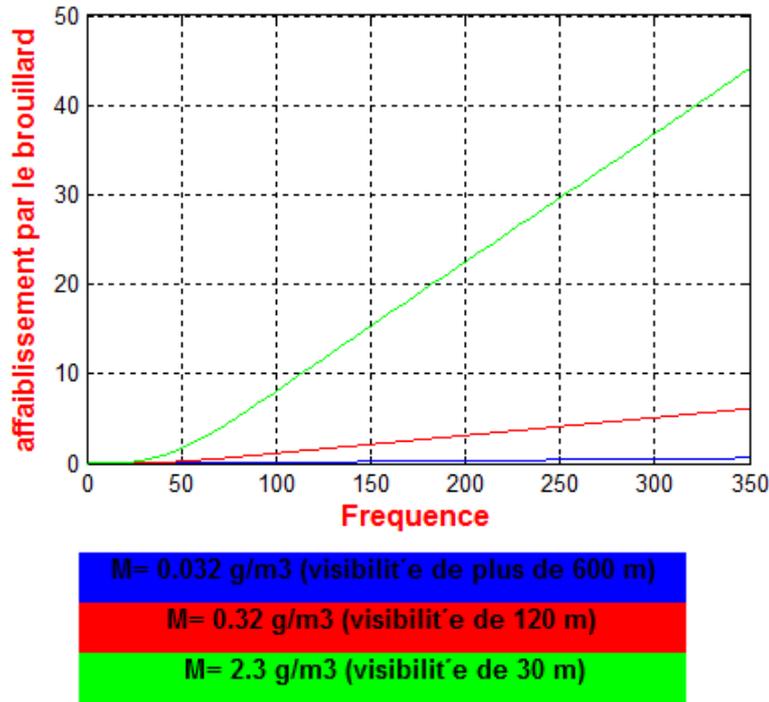


Figure II.7 Affaiblissement par le brouillard à l'aide de simulateur Matlab

- **Affaiblissement linéique spécifique**

On peut utiliser un modèle mathématique basé sur la diffusion de Rayleigh, qui utilise un modèle de Debye double pour la permittivité diélectrique $\epsilon(f)$ de l'eau pour calculer la valeur de K_1 pour les fréquences inférieures à 1 000 GHz [30] :

$$K_1 = \frac{0.819 \cdot f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad [(\text{dB/km})/(\text{g/m})] \quad (\text{II.31.1})$$

Où f est la fréquence [GHz] et:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (\text{II.31.2})$$

La permittivité diélectrique complexe de l'eau est donnée par la formule:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (\text{II.32})$$

$$\varepsilon'(f) = \left[\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (f/f_p)^2} \right] + \left[\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (f/f_s)^2} \right] + \varepsilon_2 \quad (\text{II.33})$$

Où:

- $\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 (\theta - 1)$
- $\varepsilon_1 = 0,0671 \varepsilon_0$
- $\theta = 300 / T$
- T est la température (K).

Les fréquences de relaxation principale et secondaire sont:

$$f_p = 20,20 - 146 (\theta - 1) + 316 (\theta - 1)^2 \quad (\text{GHz}) \quad (\text{II.34})$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{GHz}) \quad (\text{II.35})$$

II.6 Exemples de calcul

II.6.1 Cas 1 : Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère

- **Résultat obtenu avec la fréquence de 10 GHz**

A l'aide de l'interface graphique que nous avons réalisé on fait les différents calculs des affaiblissements.

On commence tout d'abord par le calcul d'affaiblissement du aux gaz d'atmosphère. On va choisir la valeur de fréquence égale à 10 GHz, la longueur de 1 Km .Les résultats de calculs est dans la figure suivante :

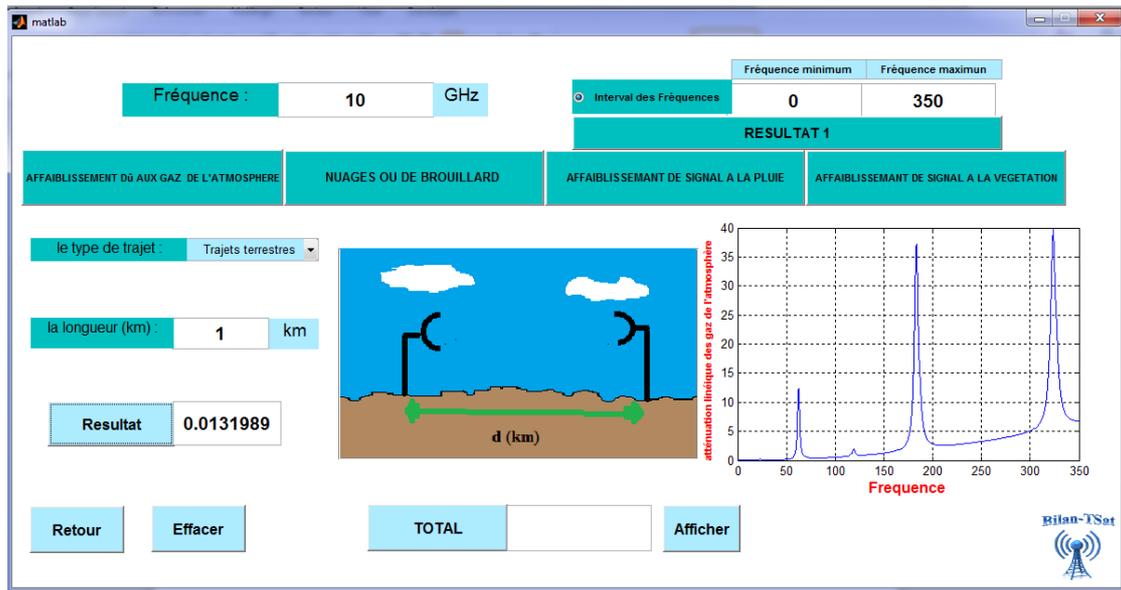


Figure II.8 Résultat obtenu pour l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère

Pour une nouvelle opération on vide les cases par un click sur le Botton « Effacer ». On fait varier la fréquence et on note les résultats de calcul au tableau suivant :

Fréquence (GHz)	10	30	50
Résultat	0.0131989	0.0882823	0.558082

Tableau II.2 Résultat d'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère pour différentes valeurs de fréquences

II.6.2 Cas 2 : Affaiblissement dû au nuage ou de brouillard

- **Résultat obtenu avec la fréquence de 10 GHz**

Maintenant on fait le calcul d'affaiblissement dû au nuage ou de brouillard. Toujours on prend la valeur de la fréquence égale à 10 GHz, la concentration 2.3 g/m^3 et la distance de 1 km.

Les résultats de calculs est dans la figure suivante :

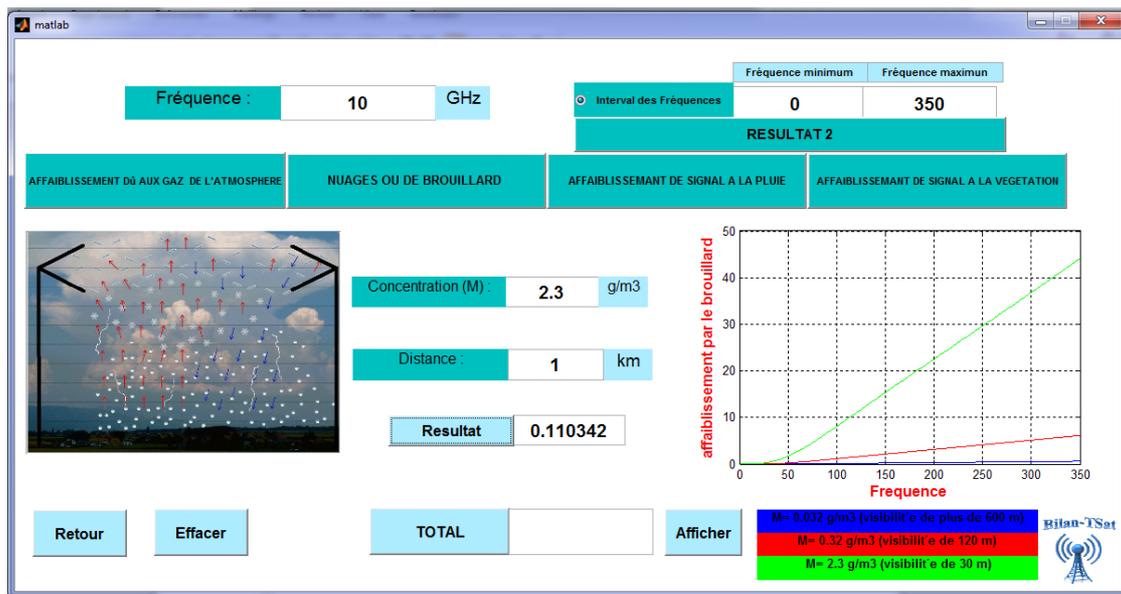


Figure II.9 Résultat obtenu pour l’affaiblissement dû au nuage ou de brouillard

Pour vider les cases pour une nouvelle opération on appuyé sur « Effacer », on varie la valeur de la fréquence et on note le résultat dans le tableau suivant :

Fréquence (GHz)	10	20	30
Résultat	0.110342	0.4383371	0.975317

Tableau II.3 Résultat d’affaiblissement du au nuage ou de brouillard pour différent valeurs de fréquences

II.6.3 Cas 3 : Affaiblissement de signal à la pluie

- **Résultat obtenu avec la fréquence de 10 GHz**

Pour ce cas on fait les calculs d’affaiblissement de signal à la pluie.

La fréquence qu’on nous avons pris en considération égale à 10 GHz, Taux de précipitation 100 mm/heurs et la distance de 1 Km.

Les résultats dans la figure suivante :

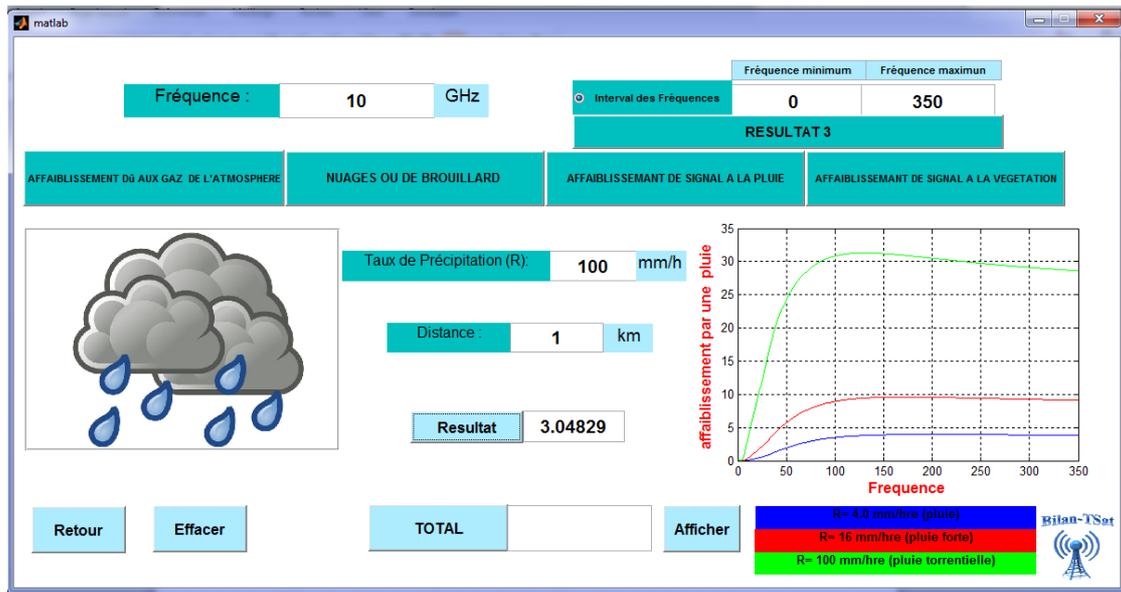


Figure II.10 Résultat obtenu pour l'affaiblissement de signal à la pluie

Pour vider les cases pour une nouvelle opération toujours on appuyé sur le Botton « Effacer ». On varie la valeur de la fréquence et on note les résultats dans le tableau suivant :

Fréquence (GHz)	5	7	10
Résultat	0.280962	1.26685	3.0482

Tableau II.4 Résultat d'affaiblissement de signal à la pluie pour différent valeurs de fréquences

II.6.4 Cas 4 : Affaiblissement de signal à la végétation

- Résultat obtenu avec la fréquence de 10 GHz

Pour la dernière opération et le dernier cas, on fait le calcul d'affaiblissement de signal à la végétation.

On fait le calcul avec la fréquence de 10 GHz.

Les résultats est dans la figure suivante :

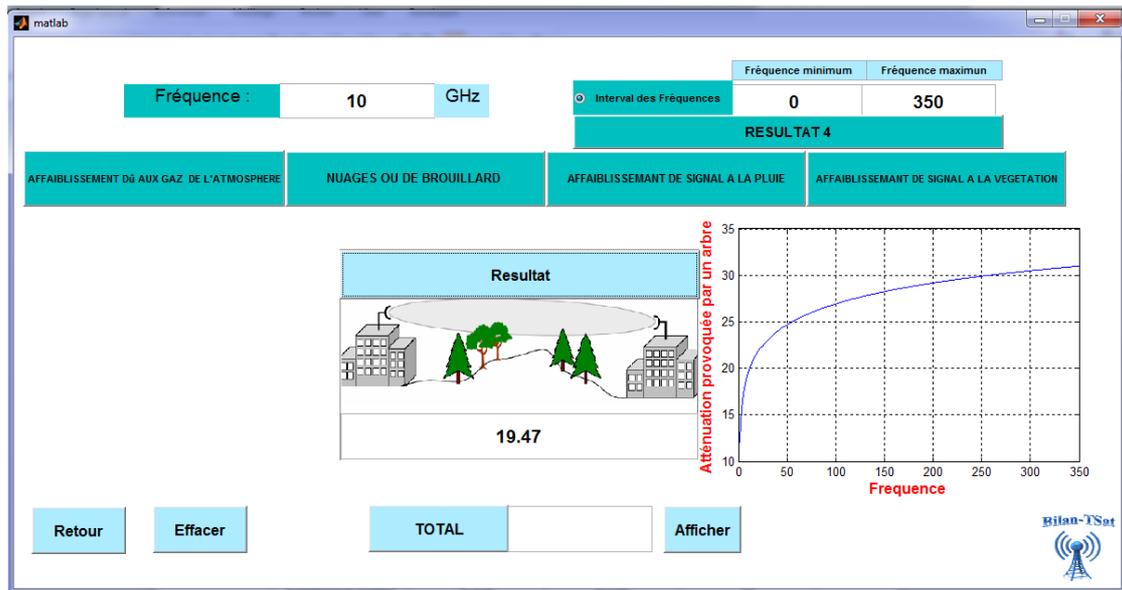


Figure II.11 Résultat obtenu pour l’affaiblissement de signal à la végétation

Toujours pour une nouvelle opération, on vide les cases par un click sur le Botton « Effacer ».

On fait varier la fréquence et on note les résultats dans le tableau suivant.

Fréquence (GHz)	0.350	0.550	10
Résultat	8.60875	10.0731	19.47

Tableau II.5 Résultat d’affaiblissement de signal à la végétation pour différent valeurs de fréquences

II.6.5 Affaiblissement Total

Pour une fréquence de 10 GHz, on fait le calcul de la somme des différents affaiblissements que nous avons calculé au précédant :

La figure suivant montre le résultat total des différents affaiblissements que nous avons calculé.

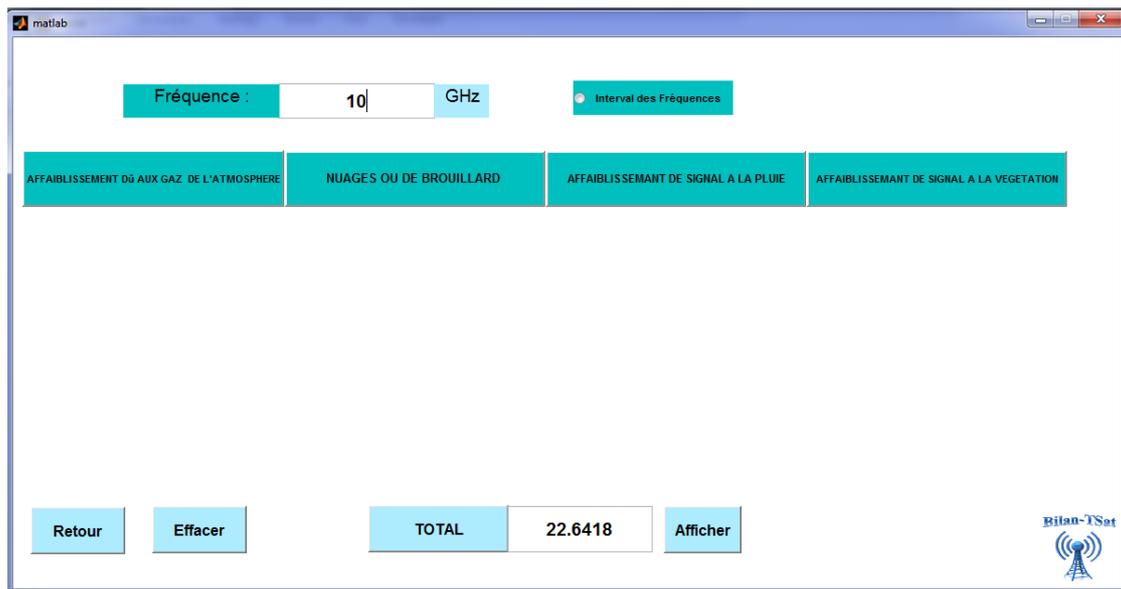


Figure II.12 Résultat total obtenu pour les différents affaiblissements

Le tableau ci-dessous contient les différentes valeurs d'affaiblissements que nous avons calculé préalablement avec la fréquence de 10 GHz, et le résultat total de ces affaiblissements. Encore nous avons varié la fréquence et nous avons pris comme valeur de 15 GHz, les résultats sont comme suit :

Fréquence	10	15
Affaiblissement de signal à la végétation	19.47	20.7836
Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère	0.0131989	0.0259296
Affaiblissement de signal à la pluie	3.0482	6.13295
Nuages ou de brouillard	0.110342	0.247564
Total	22.6418	27.19

Tableau II.6 Résultat des différents affaiblissements pour deux valeurs de fréquences

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents cas d'affaiblissements comme l'affaiblissement du aux gaz atmosphérique, l'affaiblissement du a la pluie, de nuages ou de brouillard et l'affaiblissement a la végétation.

Ces différents atténuations qui peuvent intervenir au cours d'une liaison radiofréquence, constitues l'un des principaux problèmes que l'on rencontre.

Et pour terminer ce chapitre, nous avons simulé et calculé différentes atténuations sous le simulateur Matlab.

Nous avons remarqué que les pertes de propagation en différents environnement et fréquences sont très importantes et les pertes de propagation à la présence de pluie sont très élevées.

CHAPITRE III

BILAN DE LIAISON

III.1 Introduction

Dans une liaison radioélectrique entre un émetteur et un récepteur le rapport de la puissance fournie par l'émetteur à la puissance disponible à l'entrée du récepteur dépend de plusieurs facteurs tels que les pertes dans les antennes ou dans les lignes de transmission qui les alimentent, l'affaiblissement dû aux divers mécanismes de propagation, les pertes dues à une mauvaise adaptation des impédances ou de la polarisation, etc. [35]

L'atténuation ou l'affaiblissement est la diminution relative de la puissance d'un signal au cours de sa transmission, que ce soit dans les lignes de transmission ou dans la transmission hertzienne, est une grandeur importante dans les télécommunications. [36]

Donc avant d'installer un système radiocommunication ou une liaison hertzienne, il est nécessaire d'effectuer le calcul de bilan de liaison. En effet ce calcul permet de déterminer si le niveau de puissance reçu par le récepteur sera suffisant pour que la liaison fonctionne correctement. [37]

III.2 Bilan de liaison hertzienne

III.2.1 Définition

Le bilan de liaison (ou Link budget en anglais) est un outil fondamental pour dimensionner les puissances à mettre en jeu dans un canal de transmission.

Le bilan de liaison fait la somme de la puissance émise et de tous les gains et les pertes rencontrés jusqu'au récepteur, ainsi que les marges ajoutées par le concepteur, fournissant la puissance reçue par le récepteur. Celle-ci doit être supérieure au seuil de réception, lié au niveau de bruit du récepteur et du rapport signal à bruit minimal pour assurer une détection du signal et une qualité de services suffisante.

La figure ci-dessous présente un schéma général de principe d'une liaison hertzienne [37]:

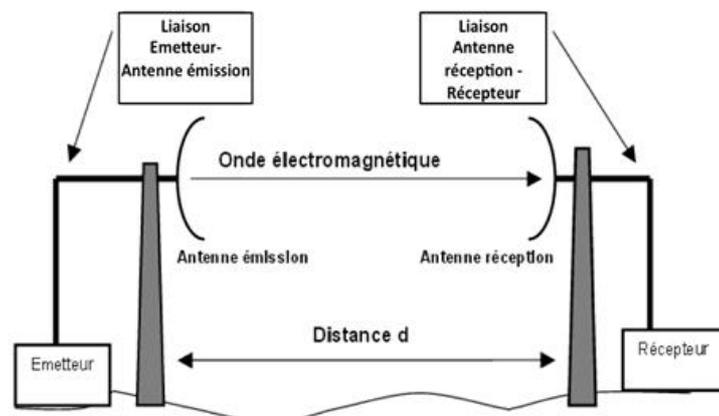


Figure III.1 Schéma de principe d'une liaison hertzienne

- **Emetteur** : Il est caractérisé par sa puissance émise P_E .
Ici P_E sera exprimée en dBm ou dBW. Ordre de grandeur : de quelques mW (0dBm) à plusieurs kW (> 30dBW).
- **Liaison émetteur- antenne émission** : Elle est généralement réalisée en câble coaxial. A plus haute fréquence (> quelques GHz), elle peut être réalisée en guide d'onde Elle est caractérisée par son atténuations L_E , exprimée en dB.

Dans les petits systèmes, où tout est intégré (Wifi, téléphone mobile, etc..) cette liaison n'existe pas ($L_E = 0dB$).

- **Antenne émission** : Elle est caractérisée par son Gain d'antenne G_E , exprimé en dBi.
- **Distance d** : c'est la distance entre l'émetteur et le récepteur. On peut montrer (à partir du calcul de la sphère de l'antenne isotrope et de la définition du gain d'antenne), que la distance entre l'émetteur et le récepteur, introduit une atténuation A_{EL} (pour atténuation en espace libre) égale à : [38]

$$A_{EL} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad \text{(III.1)}$$

Cette grandeur exprimée en dB.

- **Liaison antenne réception- récepteur** : Comme la liaison émetteur-antenne émission, la liaison antenne réception-récepteur est caractérisée par l'atténuation L_R , exprimée en dB.
- **Antenne réception** : Elle est caractérisée par son gain d'antenne G_R , exprimé en dBi.
- **Récepteur** : Le paramètre qui nous intéresse ici est P_R , puissance reçue par le récepteur, est généralement exprimée en dBm. [38]

III.2.2 Sensibilité d'un récepteur

La sensibilité d'un récepteur est l'amplitude du signal qu'il faut appliquer à son entrée pour obtenir à la sortie du démodulateur un rapport signal/bruit déterminé (transmission analogique) ou un taux d'erreur donné en transmission numérique (10^{-3} ou 10^{-6}). [39]

III.2.3 Expression de la puissance reçu

Une liaison radio est établie au moyen d'un émetteur de puissance P_E équipé d'une antenne directive, de gain G_E par rapport à une antenne isotrope, le récepteur est équipé d'une antenne directive de gain G_R pointé vers l'émetteur. [38]

Si on néglige l'influence des obstacles, difficile à évaluer, on peut calculer la puissance reçue P_R à l'entrée du récepteur grâce à la formule de Friis :

$$P_R = G_E * G_R * P_E * \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- P_E, P_R : En watts.
- d et λ en mètre.
- G_E et G_R sans unité.

Si on exprime la puissance en dBm et les gains en dB, la formule de Friis devient après simplification : [39]

$$P_R = P_E + G_R + G_E - 20 \log(f) - 20 \log(d) + 147.5 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

- P_E, P_R : En dBm.
- d en mètre.
- f en Hz
- G_E et G_R en dBi.

III.2.4 Condition de bon fonctionnement d'une liaison hertzienne

Pour qu'une liaison hertzienne fonctionne correctement, il faut que la puissance reçue soit supérieure à la sensibilité du récepteur. De plus, on prendra généralement une marge (on essaiera d'avoir des dB en plus) pour tenir compte des atténuations supplémentaires qui peuvent être dues à des réflexions multiples ou à la météo (pluie, neige, brouillard, etc..). [40]

III.3 Les zones de rayonnement d'une antenne

On distingue pour chaque type d'antenne trois zones de rayonnement :

- Zone de Rayleigh (ou zone de champ proche).
- Zone de Fresnel.
- Zone de Fraunhofer (ou zone de champ lointain)

Dans cette zone on considère la distance r grande par rapport à la longueur d'onde. [41]

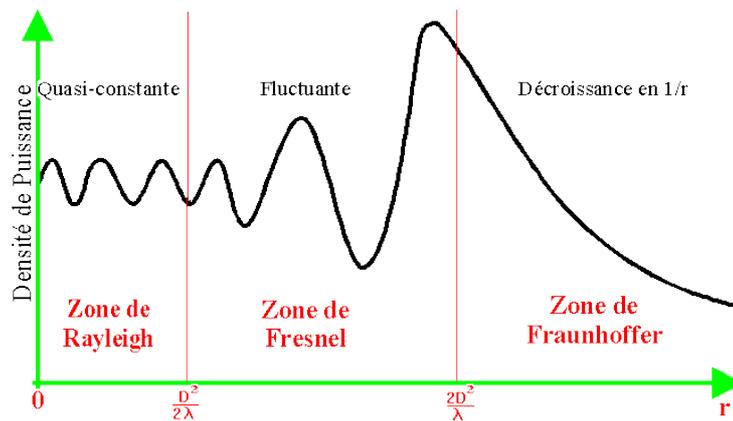


Figure III.2 Les zones de rayonnement d'une antenne

III.3.1 Zone de Rayleigh

La zone de Rayleigh ou zone de champ proche la densité de puissance est quasi-constante. [41]

$$r < \frac{D^2}{2\lambda} \quad \text{(III.4)}$$

Avec :

D : la dimension linéaire maximale de l'antenne.

III.3.2 Zone de Fresnel

L'ellipsoïde de Fresnel est un volume dans l'espace permettant d'évaluer l'atténuation apportée par un obstacle (bâtiment, arbre...) à la propagation d'une onde radio, il est généralement utilisé dans le cas de liaisons VHF, UHF ou hyperfréquences.

Cette méthode permet d'évaluer le rayon à l'intérieur duquel se produit l'atténuation le long du trajet de l'onde et de calculer les pertes. [42]

$$r = \sqrt{\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \lambda \text{ [m]} \quad \text{(III.5)}$$

Où

r : le rayon de la zone en mètres,

d1 et d2 : sont des distances de l'obstacle aux extrémités de la liaison exprimées en mètres

La grandeur r correspond à la valeur strictement minimale pour laquelle l'espace entourant le rayon direct joignant les deux antennes est dégagé de tout obstacle [38].

III.3.2.1 Méthode Deygout pour la diffraction à plusieurs obstacles

L'effet de diffraction est utilisé dans l'ordre de quantifier l'atténuation due à une obstruction du chemin direct entre l'émetteur et récepteur par 2 obstacles.

Un obstacle primaire obtenu par le ratio de dégagement maximum v_1 par rapport à la ligne de visibilité entre l'émetteur et récepteur, et si cet obstacle primaire existe ($v_1 > 0$), un obstacle secondaire obtenu par le ratio de dégagement maximum v_2 par rapport à la ligne de visibilité entre l'émetteur et l'obstacle primaire et entre ce dernier et récepteur. [43]

L'atténuation due à un obstacle calculée en utilisant les intégrales du Fresnel.

Une approximation de la perte due à la diffraction s'exprime de la façon suivante [43] :

$$L_d = 6.6 + 20. \log | (v - 0,1 + \sqrt{1 + (v - 0,1)^2})^2 | \quad (\text{III.5.1})$$

Avec :

$$v = \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (\text{III.5.2})$$

$\frac{h}{r}$: Rapport du « dégagement ».

h : la hauteur d'obstacle.

r : le rayon de la zone en mètres.

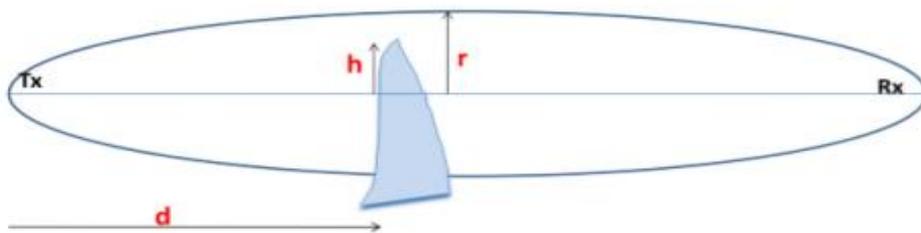


Figure III.3 Zone de Fresnel avec obstacle

III.3.3 Zone de Fraunhofer

La zone de Fraunhofer ou zone de champ lointain, les champs sont rayonnées sous forme d'onde plane. La densité de puissance d'écrit en $1/r^2$.

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{III.6})$$

Où :

r : le rayon de la zone en mètres,

D : est la dimension la plus grande d'une antenne.

λ : est la longueur d'onde. [38]

III.4 Bilan de liaison satellitaire

Lors de la définition d'un système de communication par satellite (figure III.4) , il est nécessaire de déterminer les dimensions des antennes d'émission et de réception , la puissance d'émission et le rapport signal sur bruit nécessaire pour pouvoir effectuer la transmission avec qualité requise.

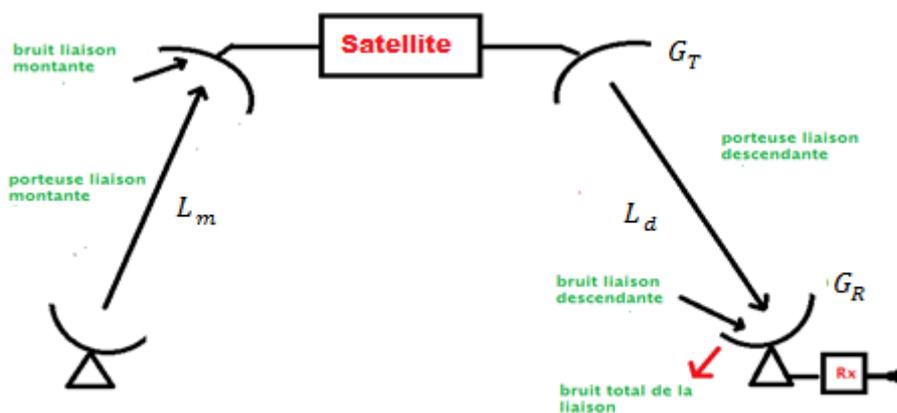


Figure III.4 Liaison Satellitaire

III.4.1 Bilan de Liaison pour la voie montante

Soit le rapport de la puissance de la porteuse sur le bruit a l'entrée de récepteur : [38]

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{up} = (\text{PIRE})_{station\ sol} * \left(\frac{1}{L}\right)_{up} * \left(\frac{G}{T}\right)_{SAT} * \left(\frac{1}{K}\right) \quad (III.7)$$

Figure III.5 Etude de la liaison montante

Où :

- $(\text{PIRE})_{station\ sol}$: la PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) qui est le produit de la puissance fournie à l'entrée de l'antenne d'émission par son gain, la PIRE est une mesure de performance de la section d'émission : [44]

$$(PIRE)_{station\ sol} = (P_T * G_T)_{station\ sol} = \left(\frac{P_{TX}}{L_{FTX}}\right)_{station\ sol} * \left(\frac{G_{T\ max}}{L_T}\right)_{station\ sol} \quad (III.7.1)$$

Avec :

$$L_T = 12 * \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{3dB}}\right)^2 (dB)[16] \quad (III.7.2)$$

L_T : Pertes par dépointage.

α_T : Angle de dépointage de la station sol.

θ_{3dB} : Angle d'ouverture de l'antenne.

L_{FTX} : Pertes entre amplificateur et antenne station sol.

- $\left(\frac{1}{L}\right)$ = pertes en espace libre et pertes atmosphériques.
- $\left(\frac{G}{T}\right)$ = facteur de mérite du récepteur ($^{\circ}K^{-1}$).

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{SAT} = \left(\frac{G_R\ max}{L_R}\right)_{SAT} * \left(\frac{1}{L_{FRX}}\right)_{SAT} * \left(\frac{1}{T}\right)_{SAT} \quad (III.7.3)$$

$\left(\frac{G}{T}\right)$: Le facteur de mérite qui décrit les performances de la partie réceptrice

Avec

$$G = \frac{G_R\ max}{(L_{FRX} * L_R)} \quad (III.7.4)$$

L_R : Pertes par dépointage à la réception.

L_{FRX} : Pertes entre antenne et le récepteur.

T : température de bruit du système (SAT).

- $\left(\frac{1}{K}\right)$ = inverse de la constante de Boltzmann. [45]

III.4.2 Bilan de liaison pour la voie descendante

Soit le rapport signal sur bruit au niveau de la station terrienne réceptrice.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{down}} = (\text{PIRE})_{\text{SAT}} * \left(\frac{1}{L}\right)_{\text{down}} * \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{station sol}} * \left(\frac{1}{K}\right) \quad (\text{III.8})$$

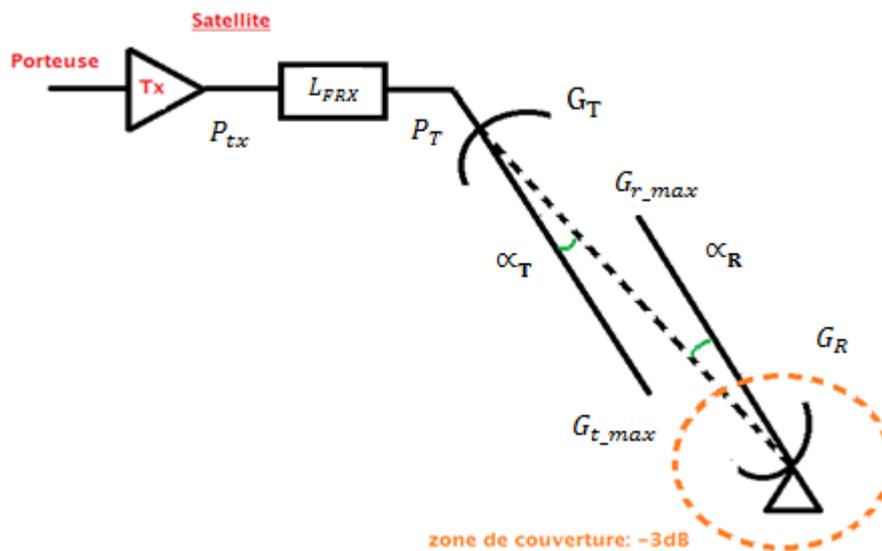


Figure III.6 Etude de la liaison descendante

$$(\text{PIRE})_{\text{SAT}} = (P_T * G_T)_{\text{SAT}} = \left(\frac{P_{\text{Tx}}}{L_{\text{FTX}}}\right)_{\text{SAT}} * \left(\frac{G_{r \text{ max}}}{L_T}\right)_{\text{SAT}} \quad (\text{III.8.1})$$

Avec :

L_T : Pertes par dépointage généralement -3dB.

α_T : Angle de dépointage de la station sol.

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{station sol}} = \left(\frac{G_{r \text{ max}}}{L_R}\right)_{\text{station sol}} * \left(\frac{1}{L_{\text{FTX}}}\right)_{\text{station sol}} * \left(\frac{1}{T}\right)_{\text{station sol}} \quad (\text{III.8.2})$$

Avec

$$L_R = 12 * \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (\text{dB}) \quad [46] \quad \text{(III.8.3)}$$

α_R : Angle de dépointage de la station sol.

T : température de bruit du système sol.

$\left(\frac{1}{L} \right)$ = pertes en espace libre et pertes atmosphériques.

$\left(\frac{1}{K} \right)$ = inverse de la constante de Boltzmann. [44]

III.4.3 Bilan de liaison global

Le rapport signal sur bruit de la liaison global se déduit des deux bilans, en voie montante et en voie ascendante, par la formule suivante:

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_T} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_{up}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_{down}} \quad \text{(III.9)}$$

Bruit total de la liaison = bruit retransmis en montant + bruit liaison descendante

$$\text{Uplink: } \left(\frac{C}{N_0} \right)_{up} = \frac{C_{up}}{N_{0 up}} \quad \text{(III.9.1)}$$

$$\text{Downlink: } \left(\frac{C}{N_0} \right)_{down} = \frac{C_{down}}{N_{0 down}} \quad \text{(III.9.2)}$$

Bruit total :

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_T = \frac{C_{down}}{N_{0 T}} \quad \text{(III.9.3)}$$

$$\frac{C}{N_0} * \frac{1}{B_N} = \frac{C}{N} \quad \text{(III.10)}$$

Avec :

N_0 : Densité spectrale équivalente de bruit (W/Hz).

$$N_0 = k * T \quad \text{(III.10.1)}$$

T : température de bruit de système (°K).

$$N = N_0 * B_N \quad \text{(III.10.2)}$$

N : Bruit total.

B_N = largeur de bande du récepteur (Hz) [45].

III.5 Température de bruit d'un système

La température de bruit d'un système est la contribution de :

- Bruit de l'antenne.
- Pertes dans le feeder (atténuation d'émetteur + atténuation du récepteur)
- Bruit du récepteur lui-même.

Ces contributions sont prises en compte à l'entrée du récepteur.

$$T = \frac{T_a}{L_{FRX}} + T_F * \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_R \quad \text{(III.11)}$$

T : température de bruit du système.

T_a : Température d'antenne.

T_F : Température du Feeder.

L_{FRX} : Pertes du Feeder.

T_R : Température équivalente de bruit à l'entrée du récepteur.

$$T_R = (F - 1) * T_0 \quad \text{(III.11.1)}$$

T_0 : Température thermodynamique.

F : Facteur de bruit. [44]

III.5.1 Température de bruit d'une antenne de station sol

III.5.1.1 Ciel clair

$$T_a = T_{sol} + T_{cs} \quad (III.12)$$

Avec :

T_{cs} : Contribution au bruit d'antenne à partir du ciel.

T_{sol} : Contribution au bruit d'antenne à partir du sol.

III.5.1.2 Pluie

$$T_a = T_{ciel} + T_{sol} = \frac{T_{cs}}{A_{pluie}} + T_{atm} * \left(1 - \frac{1}{A_{pluie}}\right) + T_{sol} \quad (III.13)$$

- A_{pluie} : Atténuation due à la pluie, nuages et gaz atmosphériques le long de l'axe principal.
- T_{atm} : température moyenne de l'atmosphère. [44] [45]

III.6 Calculs effectués et résultats

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans cette partie à l'implémentation de notre application.

Nous commençons tout d'abord par l'organigramme générale de l'application après on définitif notre environnement logiciel et nous terminons par une partie tests et comparaisons de nos résultats.

III.7 Les étapes d'application

III.7.1 L'interface de calculs

L'interface réalisée est basée sur les organigrammes donnés par les figures III.7, III.8, III.9, III.10.

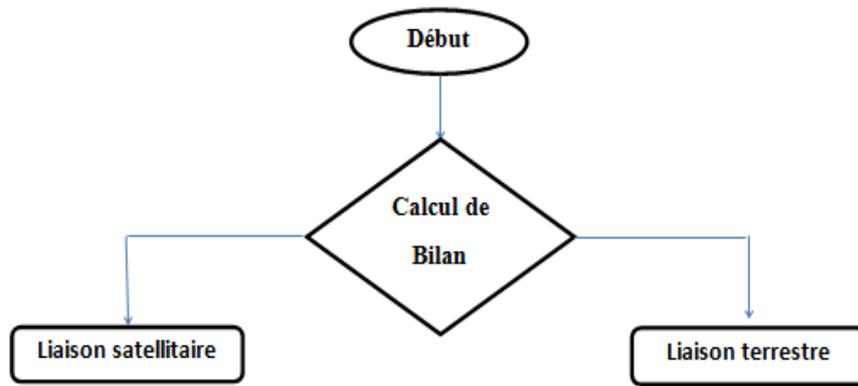


Figure III.7 Organigramme générale

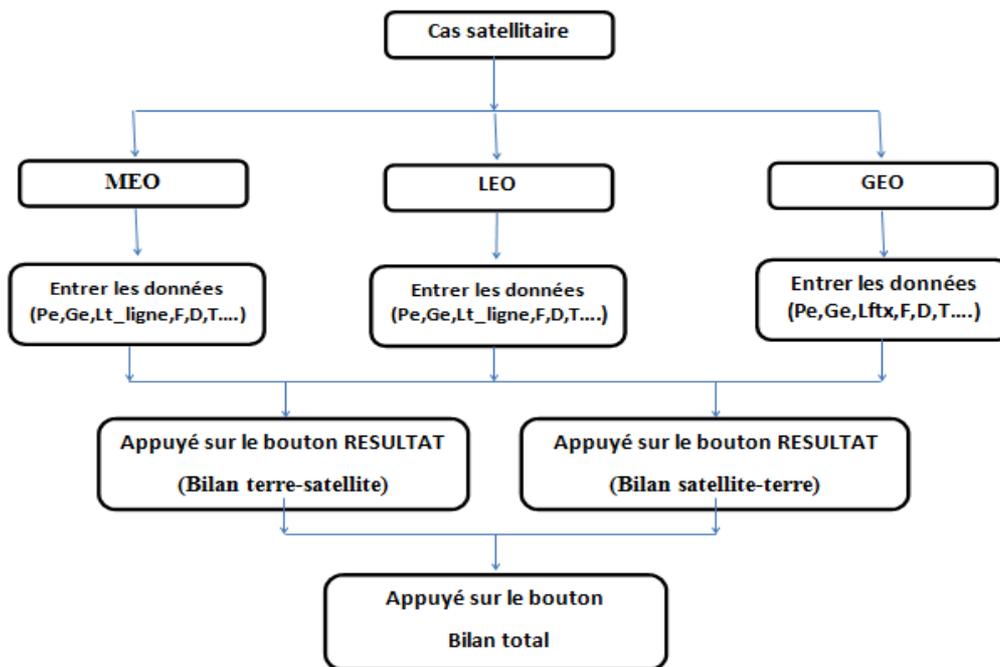


Figure III.8 Organigramme détaillé dans le cas satellitaire

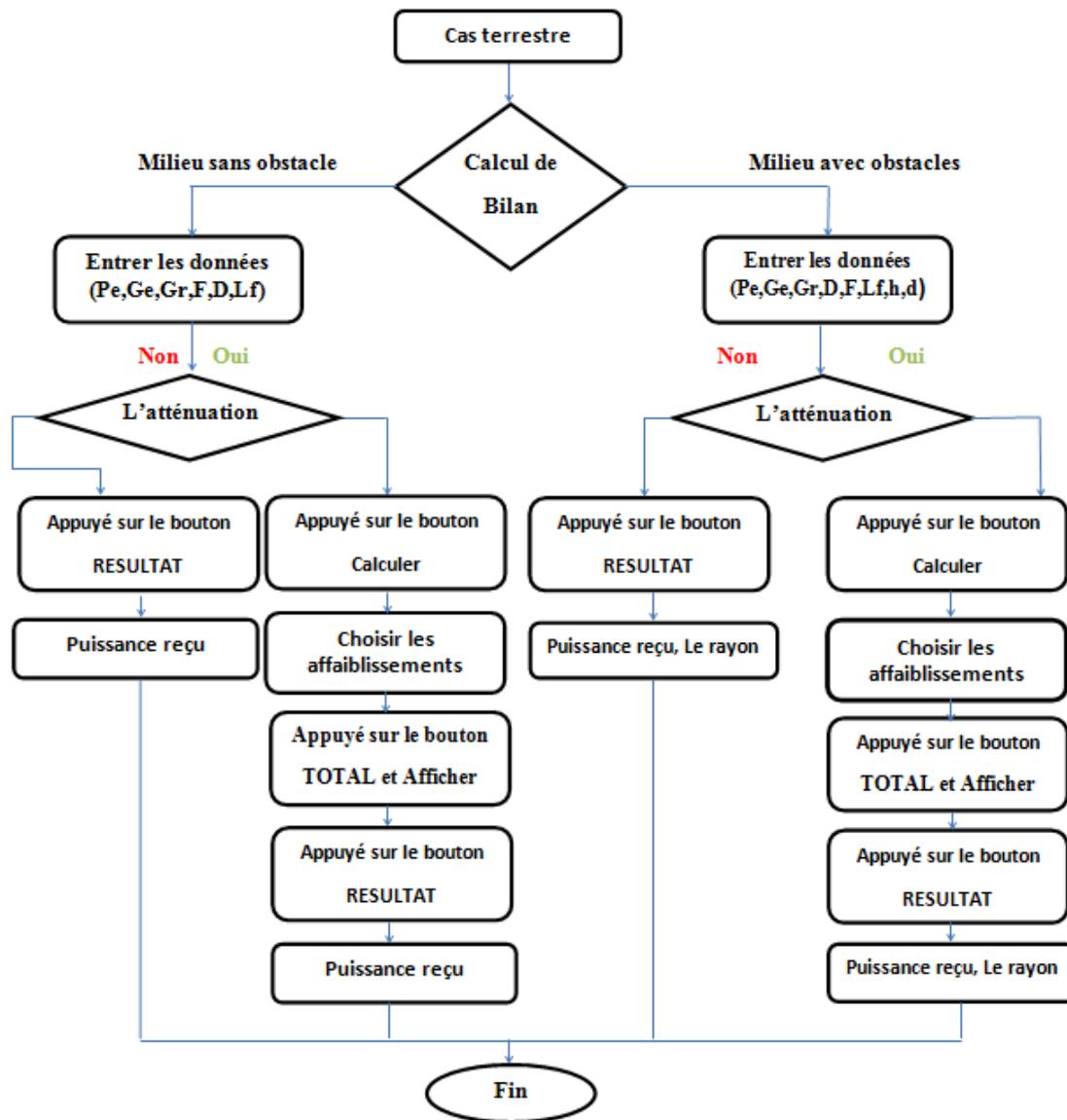


Figure III.9 Organigramme détaillé dans le cas terrestre

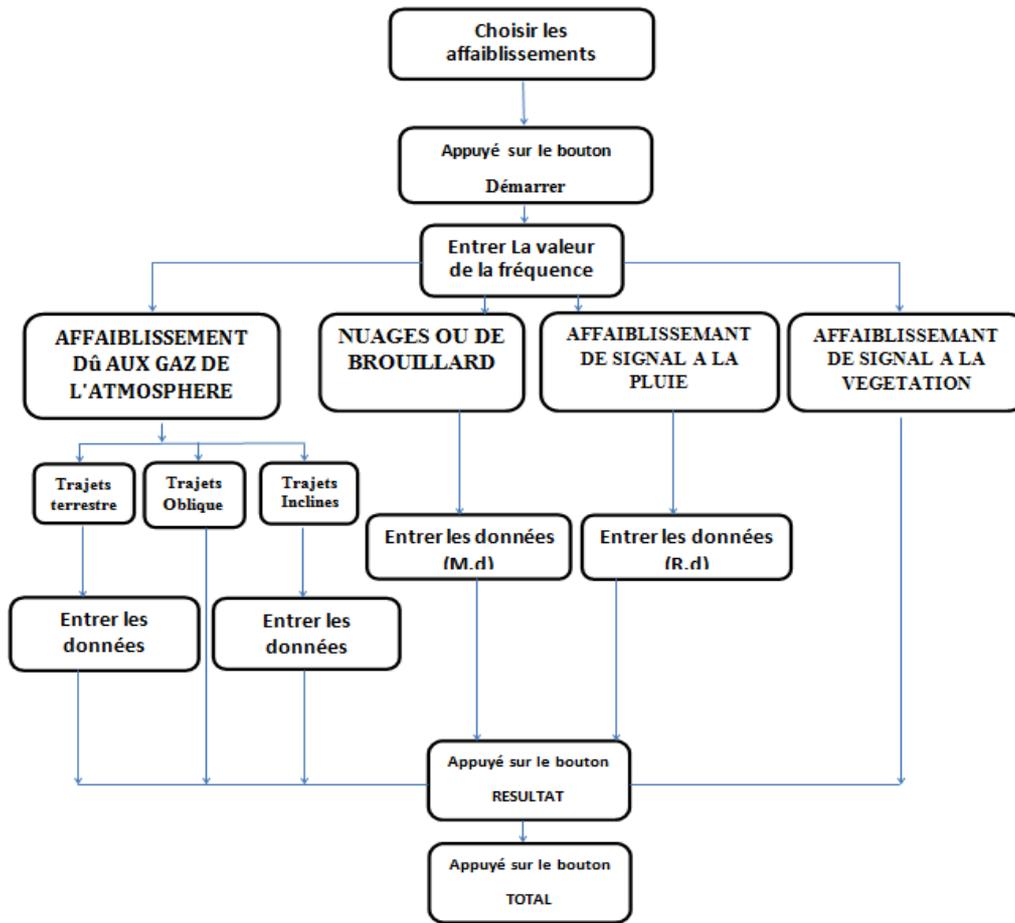


Figure III.10 Organigramme des différents affaiblissements.

III.7.2 Présentation de l'interface

Après le lancement de l'application, une boîte de dialogue va apparaître à l'écran (figure III.11) pour choisir entre le cas terrestre ou satellitaire.



Figure III.11 Boite de dialogue

III.7.2.1 Liaison terrestre

Pour le calcul du bilan de liaison dans le cas terrestre, on appuie sur le bouton «OK», une boîte de dialogue va apparaître à l'écran (figure III.12) pour choisir entre un milieu sans ou avec obstacles.

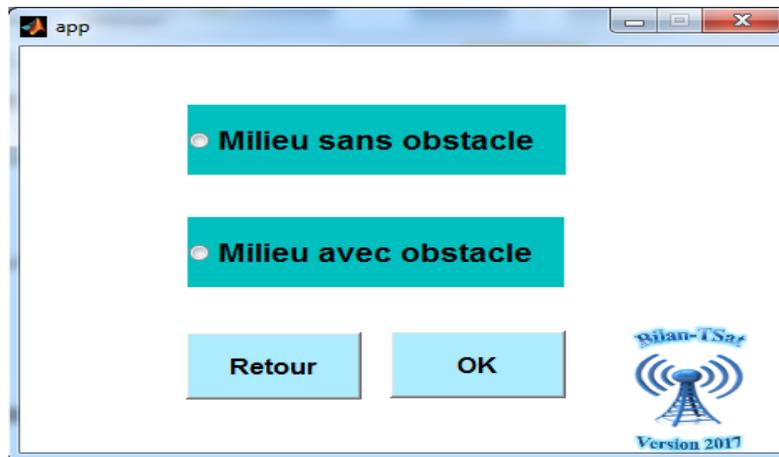


Figure III.12 Boite de dialogue

- **Choix 1 « Milieu sans obstacle »**
- *Sans des atténuations*

Une nouvelle interface graphique (figure III.13) va apparaître.

En utilisant les équations (III.2) et (III.3) pour calculer la puissance reçue, on est amené alors à saisir les paramètres de l'équation de Friis à savoir :

- Au niveau de l'émetteur : la puissance d'émission, le gain de l'antenne émettrice.
- Au niveau du récepteur : la sensibilité, le gain de l'antenne réceptrice.
- Les pertes de Feeder.
- La distance entre l'émetteur et le récepteur.
- La fréquence

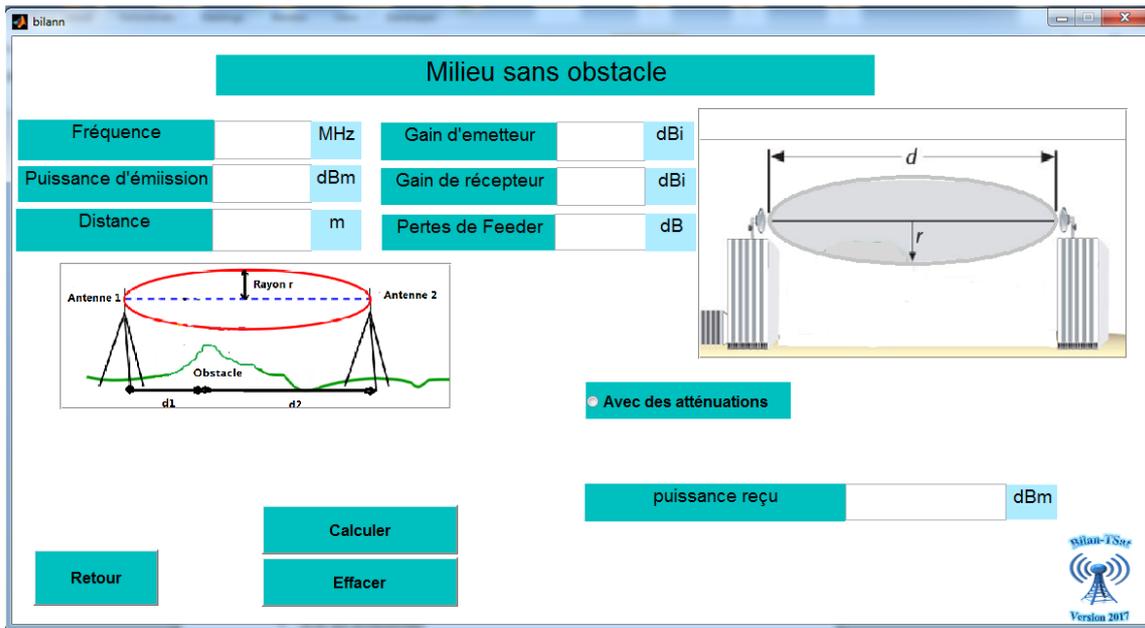


Figure III.13 Interface d'un milieu sans obstacle-sans atténuations-

- Avec des atténuations

Maintenant nous ajoutons les différents cas d'atténuations.

L'interface graphique de ce cas est dans la figure ci-dessous.

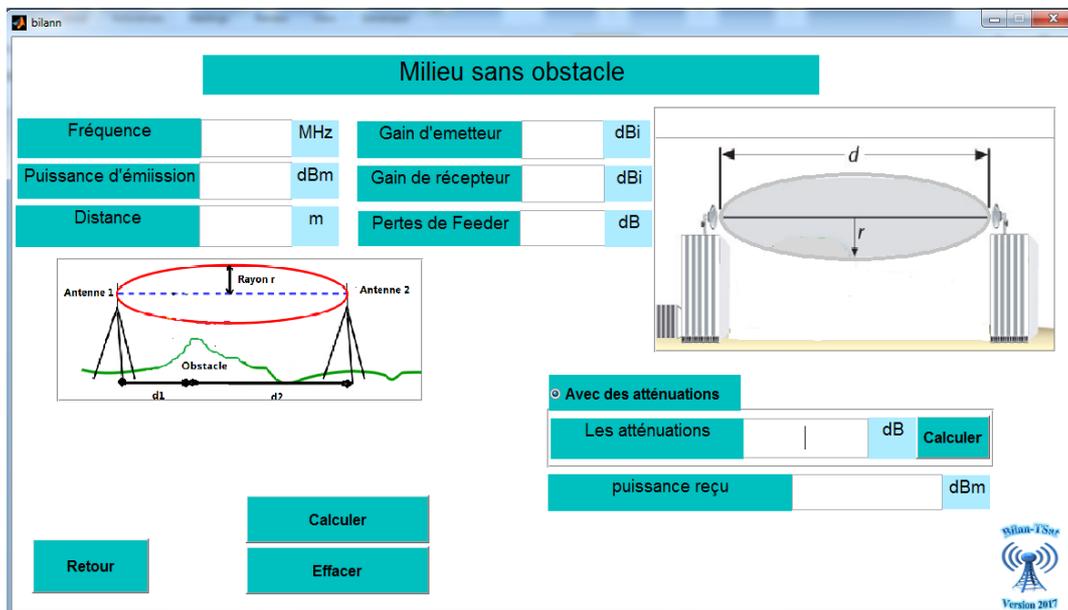


Figure III.14 Interface d'un milieu sans obstacle -Avec des atténuations-

➤ **Choix 2 « Milieu avec obstacle»**

• **Sans des atténuations**

Nous représentons dans la figure III.15 l'interface graphique qui permet de calculer la valeur du rayon de la zone de Fresnel à partir de l'équation (III.16) et la nouvelle puissance reçue (qui égal à la différence entre la valeur de la puissance reçu précédant et les pertes d'obstacle).

Pour cela nous avons choisis la méthode de Deygout pour la diffraction à plusieurs obstacles.

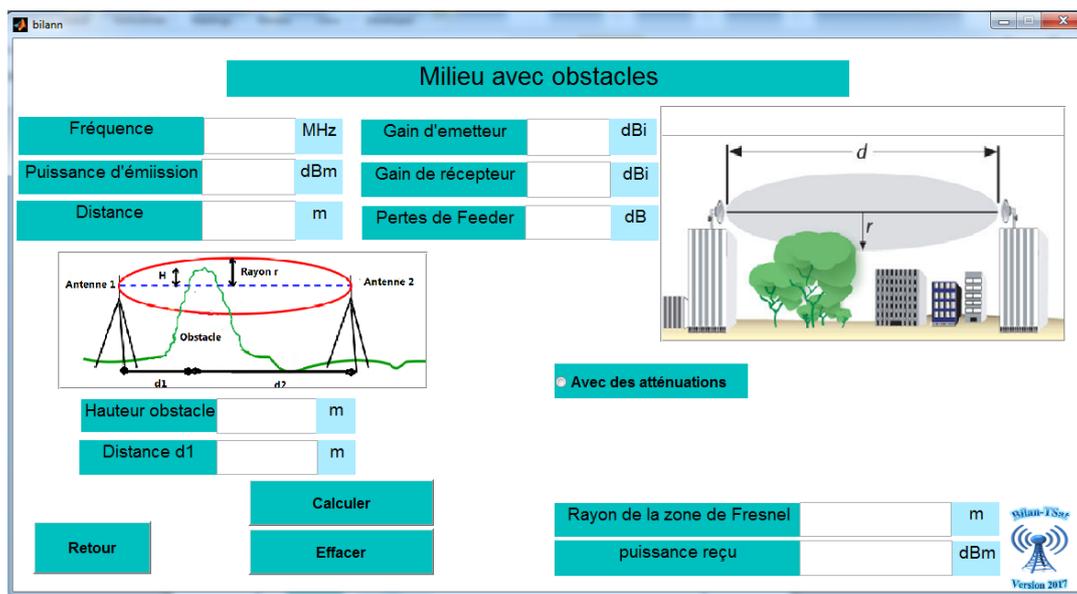


Figure III.15 Interface d'un milieu avec obstacles-sans atténuations-

➤ **Choix 3 « Milieu avec ou sans obstacle»**

• **Avec des atténuations**

Que soit dans le milieu avec ou sans obstacle, en cliquant sur le bouton atténuations nous avons la même interface graphique qui va apparaître (figure III.16).

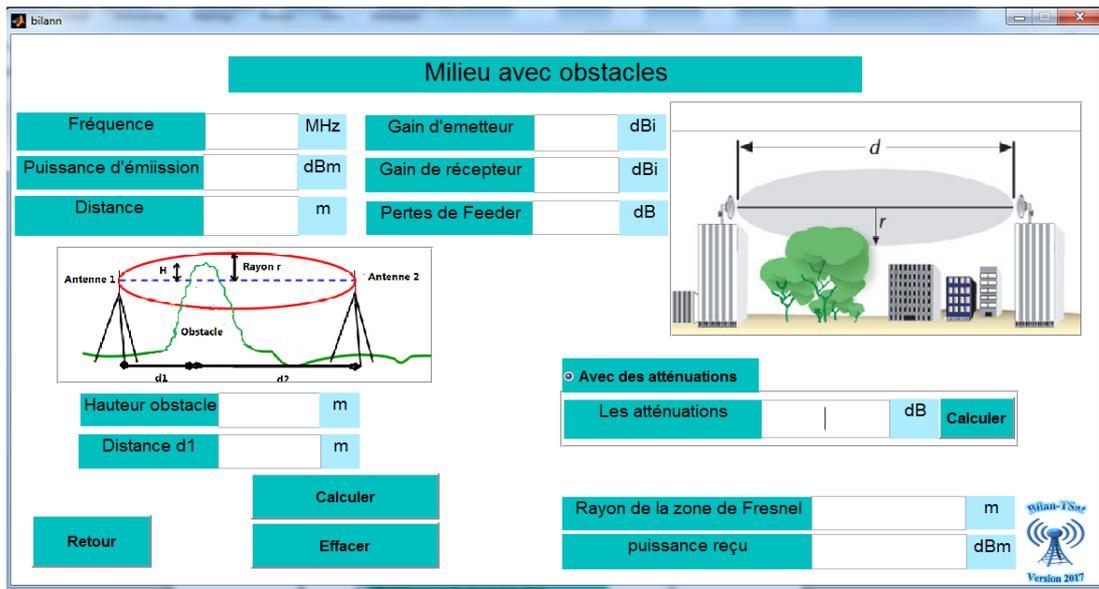


Figure III.16 Interface d'un milieu avec obstacles « Avec des atténuations »

Pour choisir les différentes cas d'atténuations on n'est obligé d'appuyer sur le Botton « calculer », après une nouvelle fenêtre va apparaitre et qui contient une listes d'atténuations.

La figure suivante montre cette liste.



Figure III.17 boîte de dialogue pour les différents cas d'atténuations

On fait le choix des différents cas d'atténuations à partir de la figure III.17 et on clique sur le Botton « OK ». On obtient une nouvelle interface graphique (figure III.18) qui vas nous permettre de calculer les différentes atténuations en fonction de la fréquence.

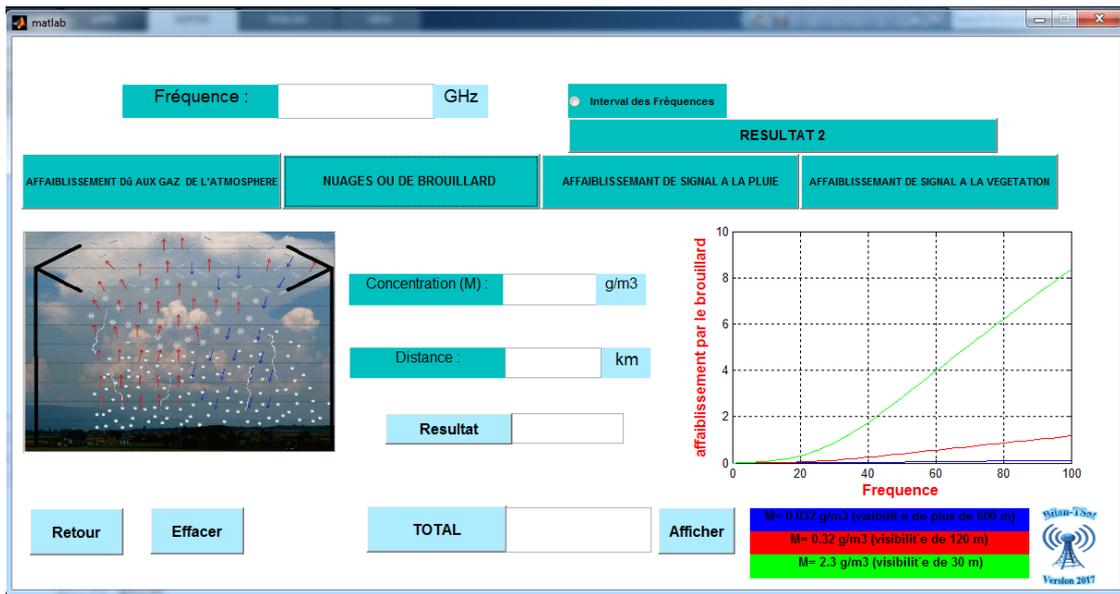


Figure III.18 Les différentes atténuations

III.7.2.2 Exemples d’application

On désire installer une liaison 4×2 Mbit/s sur une distance de 15 km. On suppose que l’on utilise la même antenne en émission et en réception.

Données	Fréquences (MHz)	Distance (m)	Puissance (dB)	Atténuation d’émetteur (dB)	Atténuation du récepteur (dB)
Valeurs	10000	15000	20	1	1

Tableau III.1 Présentation des données

- **Calcul de puissance reçu (cas sans obstacle)**
- **Sans des atténuations**

Puisque nous avons utilisé la même antenne alors le gain d’émission est égal au gain de réception.

A partir de notre interface graphique (figure III.19) on fait le calcul de la puissance reçue avec des différentes valeurs du gain.

Les résultats sont donnés dans le tableau III.2.

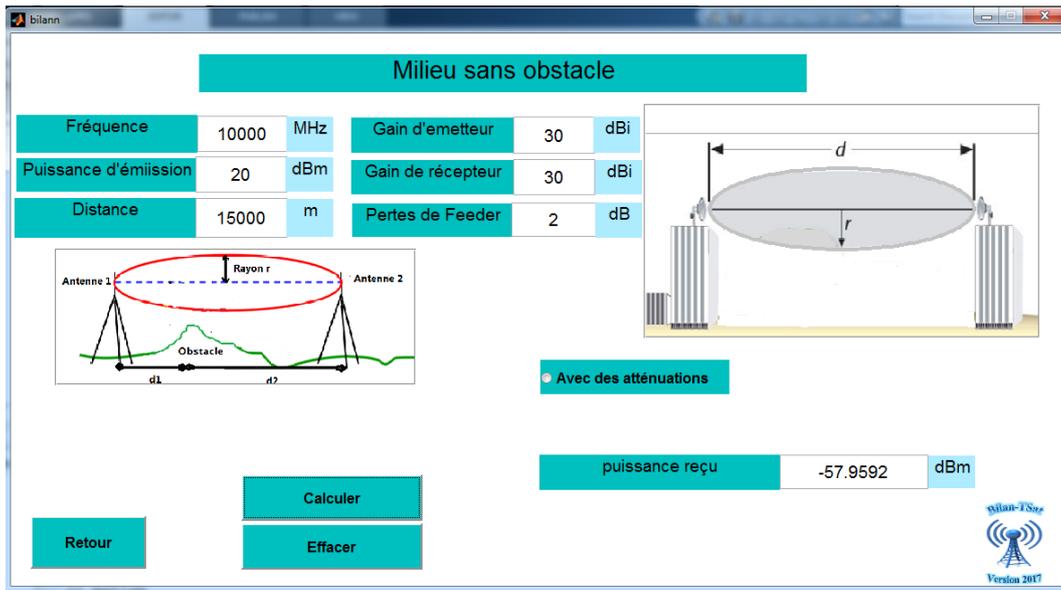


Figure III.19 Exemple d'application pour le milieu sans obstacle –sans atténuation–

Gain	Puissance reçu sans des atténuations	Puissance reçu avec des atténuations
30	-57.9592	-80.601
32	-53.9592	-76.601
35	-47.9592	-70.601
40	-37.9592	-60.601

Tableau III.2 Les puissances reçues pour le premier choix

- Avec des atténuations

Pour la fréquence de 10 GHz nous avons les atténuations égale à 22.6418 dB (Déjà calculer au chapitre II). La figure suivante montre cette valeur.

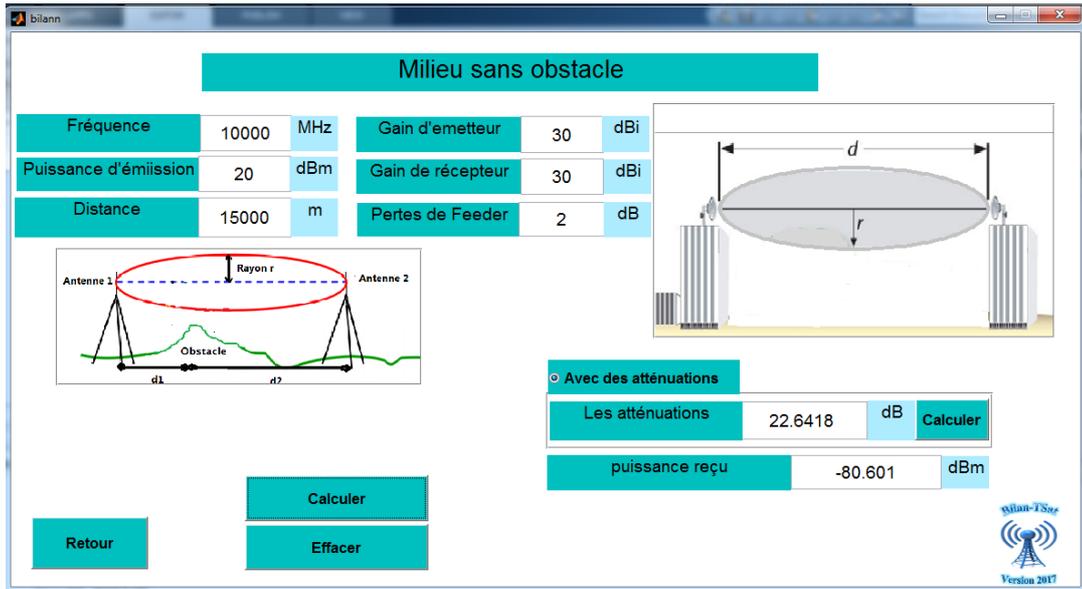


Figure III.20 Exemple d'application pour le milieu sans obstacle-avec des atténuations-

Pour une nouvel opération on appuyé sur le Botton « Effacer » qui permet de vider les cases, cette opération nous donne la main pour rentrer de nouveaux exemples avec des gains différentes. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

- **Calcul de puissance reçu (cas avec obstacle)**
- **Sans des atténuations**

Avec les mêmes valeurs de tableau III.1 on va calculer la puissance reçue et le rayon de la zone de Fresnel. Les résultats obtenue est comme suites :

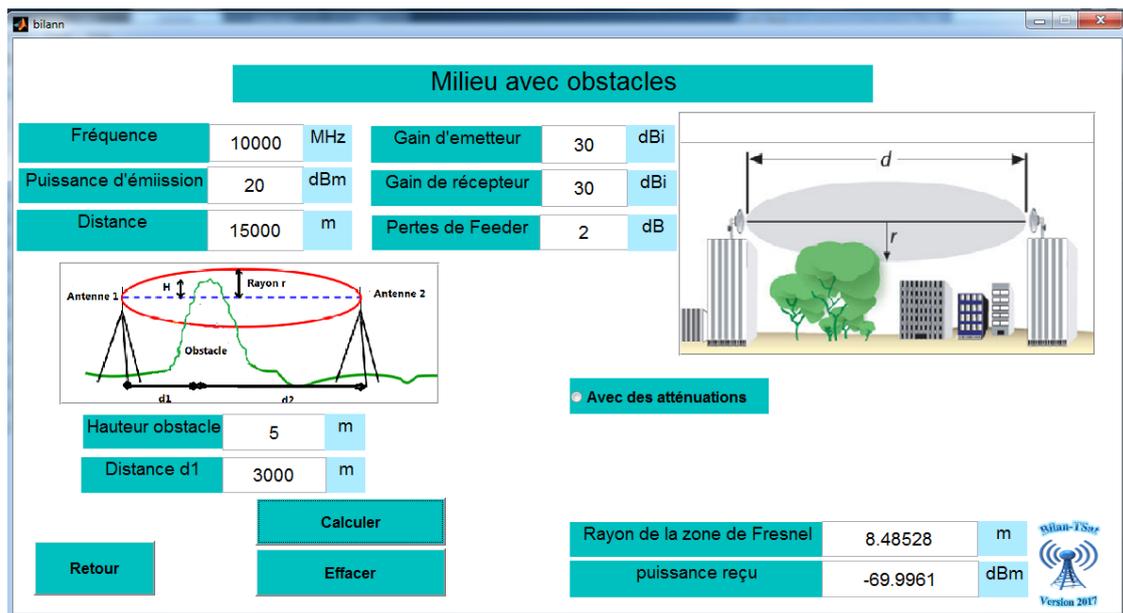


Figure III.21 Exemple d'application pour le deuxième choix

• **Avec des atténuations**

Après le choix des différentes atténuations, nous avons obtenu les valeurs de la puissance reçue et le rayon de la zone de Fresnel. Les résultats obtenus sont dans la figure ci-dessous.

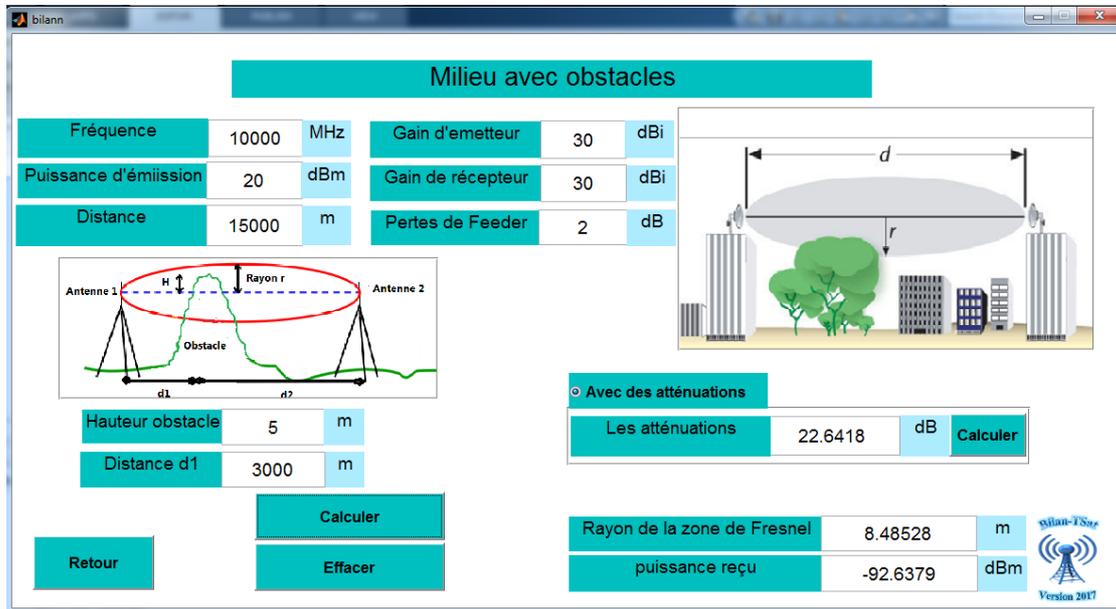


Figure III.22 Exemple d'application pour le deuxième choix « Avec des atténuations »

Le tableau III.3 contient les différentes valeurs de la puissance reçue dans un milieu avec et sans obstacles avec des gains différents.

Gain	Puissance reçu (dBm)	
	Milieu sans obstacle	Milieu avec obstacle
30	-57.9592	-69.9961
32	-53.9592	-65.9961
35	-47.9592	-59.9961
40	-37.9592	-49.9961

Tableau III.3 Comparaison des valeurs de puissance reçue

Remarque

Après comparaison de ces différentes valeurs on constate une diminution de la puissance reçue dans chaque cas étudié, ce qui montre l'effet de l'obstacle sur la puissance reçue.

➤ **Calcul de rayon (cas avec obstacle)**

On fait varier la distance et on note les valeurs du rayon dans le tableau suivant :

Distance(m)	Rayon(m)
15000	8.48528
20000	8.74643
25000	8.89944

Tableau III.4 Les résultats de rayon cas avec obstacle

Remarque

Lorsque la distance augmente le rayon de la zone de Fresnel augmente aussi, alors ils sont proportionnellement reliés.

III.7.2.3 Liaison satellitaire

Maintenant pour calculer le bilan de liaison satellitaire, on choisit le deuxième cas de la figure III.11 puis on appuyé sur le bouton « OK », une boîte de dialogue va apparaître à l'écran (figure III.23) pour choisir entre les différents cas d'orbites (MEO, LEO ou GEO).



Figure III.23 Boîte de dialogue

III.7.2.4 Exemples d'application

En utilisant les équations (III.7) et (III.8) on peut calculer le rapport de la puissance de la porteuse sur le bruit à l'entrée de récepteur voie montante, et le rapport signal sur bruit au niveau de la station terrienne réceptrice voie descendante. En utilisera l'équation (III.9) pour calculer la liaison totale.

➤ **Medium Earth Orbit (MEO)**

Pour le premier cas on va choisir le type d'orbite MEO après cette choix on click sur le Botton « OK », on obtient une nouvelle interface graphique (Figure III.24).

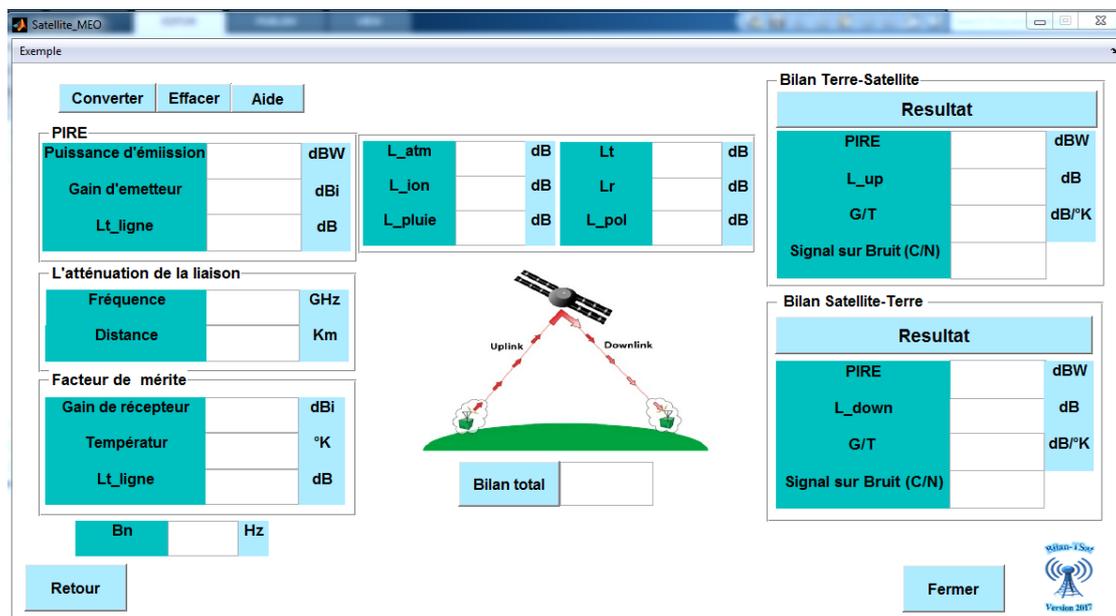


Figure III.24 Interface satellite MEO

• **Bilan de liaison d'un satellite MEO**

Les tableaux III.5 et III.6 présentent respectivement les caractéristiques de la liaison montante et descendante d'un satellite MEO.

Paramètre	Valeurs	Unités
Station Sol		
Puissance de transmission (Pe)	-27.8	Watts
Pertes total de la ligne de transmission	1	dB
Gain d'antenne(Ge)	11	dB
PIRE	-17.8	dBW
Liaison Montante		
Fréquence	0.146	GHz
Distance	1489.1	Km
Pertes de pointage	0	dB
Pertes en espace libre	139.18	dB
Perte de polarisation	3	dB
Pertes atmosphériques	0	dB
Pertes ionosphériques	0	dB
Pertes du à la pluie	0	dB
Satellite		
Perte de pointage	0	dB
Gain	0	dB
Perte de la ligne de transmission totale	2	dB
Température	290	K
G/T	-26.6	dBW
Largueur de bande	1	Hz
C/N	41.9	//

Tableau III.5 Caractéristique pour la voie montante d'un satellite MEO

Paramètre	Valeurs	Unités
Satellite		
Puissance de transmission (Pe)	-3	Watts
Pertes total de la ligne de transmission	1	dB
Gain d'antenne(Ge)	0	dBi
PIRE	-4	dBW
Liaison Descendante		
Fréquence	0.436	GHz
Distance	1489.1	Km
Pertes de pointage	0	dB
Pertes en espace libre	148.686	dB
Perte de polarisation	0	dB
Pertes atmosphériques	0	dB
Pertes ionosphériques	0	dB
Pertes du à la pluie	0	dB
Station Sol		
Perte de pointage	0	dB
Gain	8.3	dB
Perte de la ligne de transmission totale	2	dB
Température	390	K
G/T	-19.6	dBW
Largueur de bande	1	Hz
C/N	56.3	//

Tableau III.6 Caractéristique pour la voie descendante d'un satellite MEO

Les figures III.25 et III.26 présentent respectivement les résultats de calcul de bilan de liaison de la voie montante et descendante pour le cas d'un satellite MEO

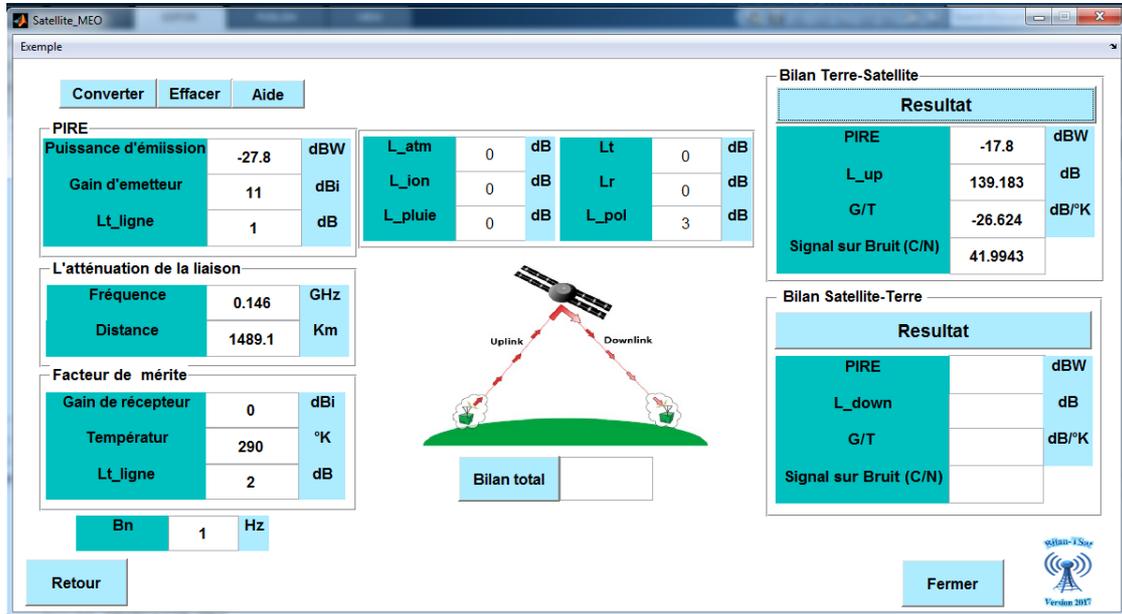


Figure III.25 Bilan de liaison de la voie montante d'un satellite MEO

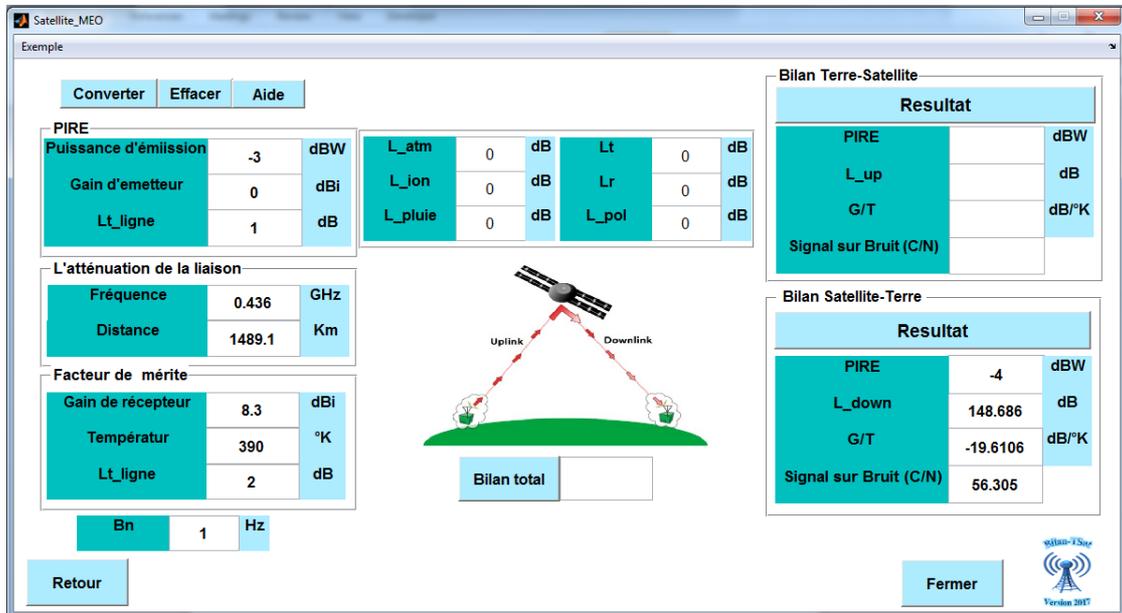


Figure III.26 Bilan de liaison de la voie descendante d'un satellite MEO

• **Bilan de Liaison Total**

Le tableau suivant montre les résultats de rapport C/N de la voie montante, descendante et le C/N total d'un satellite MEO.

C/N (uplink)	41.9
C/N (Downlik)	56.3
C/N (total)	41.8

Tableau III.7 Liaison Total Satellite MEO

La figure suivante montre les résultats de bilan de liaison d'un satellite MEO.

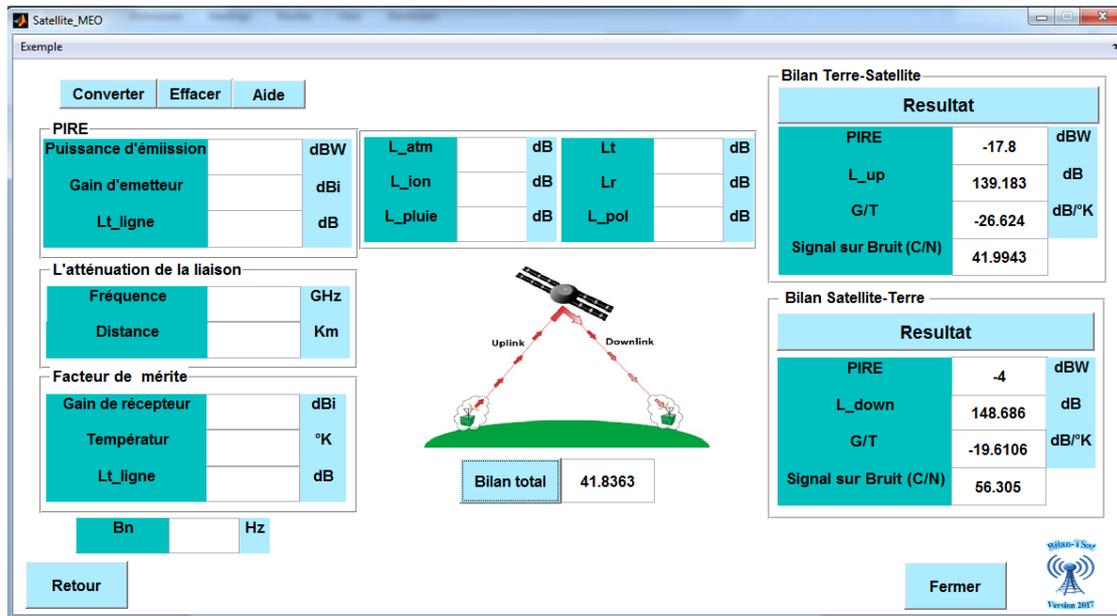


Figure III.27 Bilan de liaison total d'un satellite MEO

➤ **Low Earth Orbit (LEO)**

Pour le deuxième choix on va choisir le cas LEO, après on click sur le Botton « OK » on obtient une nouvelle interface graphique (Figure III.28).

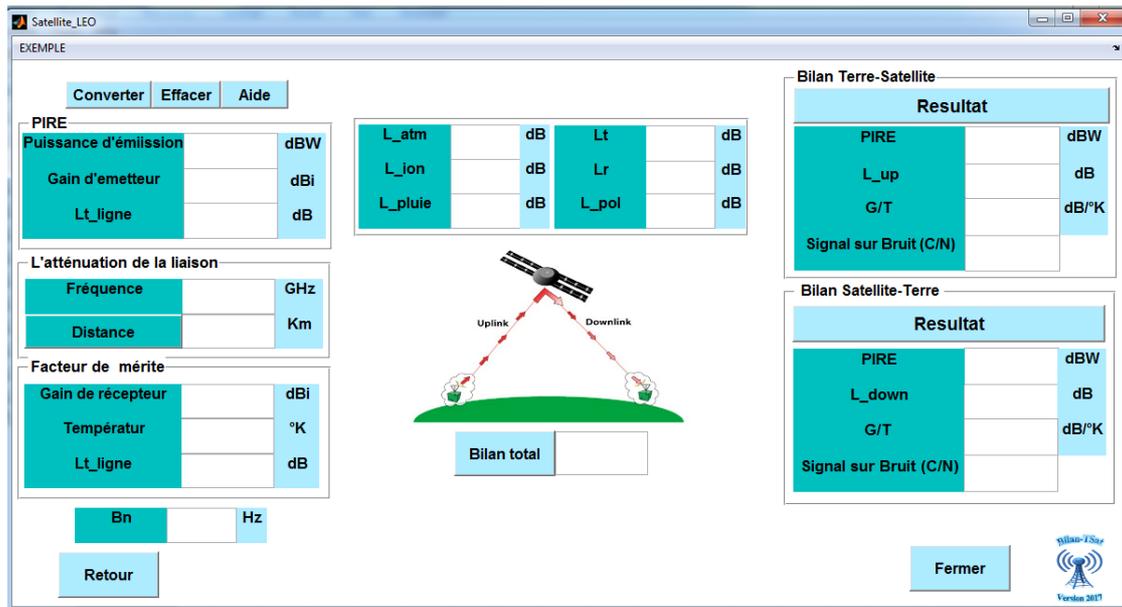


Figure III.28 Interface d'un satellite LEO

Pour cette cas d'orbite nous avons choisi comme exemple le satellite algérienne Alsat-1N.

Les tableaux III.8 et III.9 présentent respectivement les caractéristiques de la liaison montante et descendante de ce satellite (Alsat-1N).

Paramètre	Valeurs	Unités
Station Sol		
Puissance de transmission (Pe)	30	Watts
Pertes total de la ligne de transmission	5.3	dB
Gain d'antenne(Ge)	12.3	dB
PIRE	21.8	dBW
Liaison Montante		
Fréquence	145.85	MHz
Distance	2501	Km
Pertes de pointage	0.1	dB
Pertes en espace libre	143.7	dB
Perte de polarisation	0.2	dB
Pertes atmosphériques	2.1	dB
Pertes ionosphériques	0.7	dB
Pertes du à la pluie	0	dB
Satellite		
Perte de pointage	4.7	dB
Gain	2.2	dB
Perte de la ligne de transmission totale	4.4	dB
Température	280.1	K
G/T	-26.7	dBW
Largueur de bande	15000.0	Hz
C/N	30.4	//

Tableau III.8 Bilan de liaison de la voie Montante Alsat-1N

Paramètre	Valeurs	Unités
Satellite		
Puissance de transmission (Pe)	1	Watts
Pertes total de la ligne de transmission	2	dB
Gain d'antenne(Ge)	2.2	dB
PIRE	0.2	dBW
Liaison Descendante		
Fréquence	437.670	MHz
Distance	2501	Km
Pertes de pointage	4.7	dB
Pertes en espace libre	153.2	dB
Perte de polarisation	0.2	dB
Pertes atmosphériques	2.1	dB
Pertes ionosphériques	0.7	dB
Pertes du à la pluie	0	dB
Station Sol		
Perte de pointage	0.6	dB
Gain	18.9	dB
Perte de la ligne de transmission totale	5.3	dB
Température	439.2	K
G/T	-12.8	dBW
Largueur de bande	10000.0	Hz
C/N	14.4	//

Tableau III.9 Bilan de liaison de la voie Descendante Alsat-1N

Les figures III.29 et III.30 présentent respectivement les résultats de bilan de liaison de la voie montante et descendante de satellite Alsat 1-N.

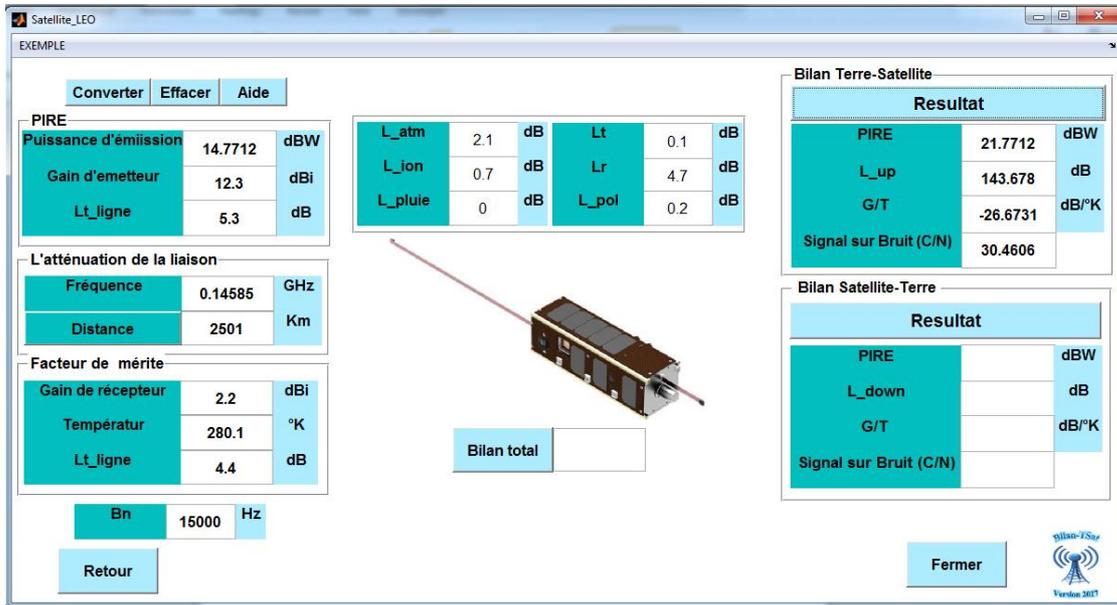


Figure III.29 Bilan de liaison de la voie montante d'Alsat-1N

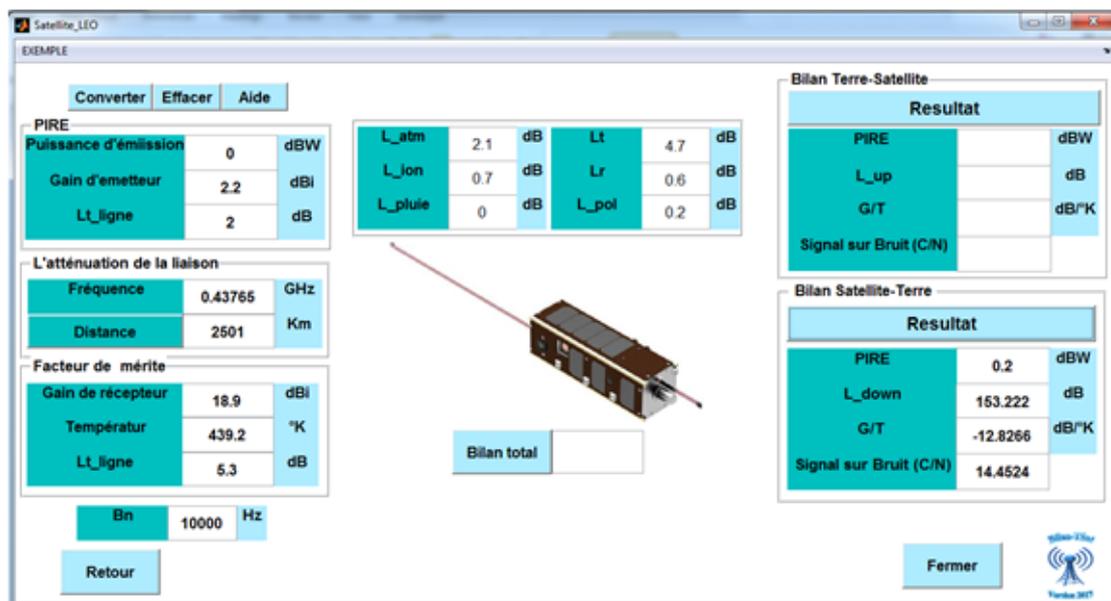


Figure III.30 Bilan de liaison de la voie descendante d'Alsat-1N

Remarque

D'après les deux figures et les deux tableaux ci-dessus, on remarque qu'on a les mêmes résultats de bilan de liaison de la voie montante et descendante.

• Bilan de Liaison Total

Le tableau ci-dessous montre les résultats de rapport C/N de la voie montante, descendante et le C/N total de satellite Alsat-1N.

C/N (Uplink)	30.4606
C/N (Downlik)	14.4524
C/N (total)	14.3449

Tableau III.10 Bilan de liaison total de satellite Alsat-1N

La figure ci-dessous montre les résultats de bilan de liaison d'un satellite Alsat-1N.

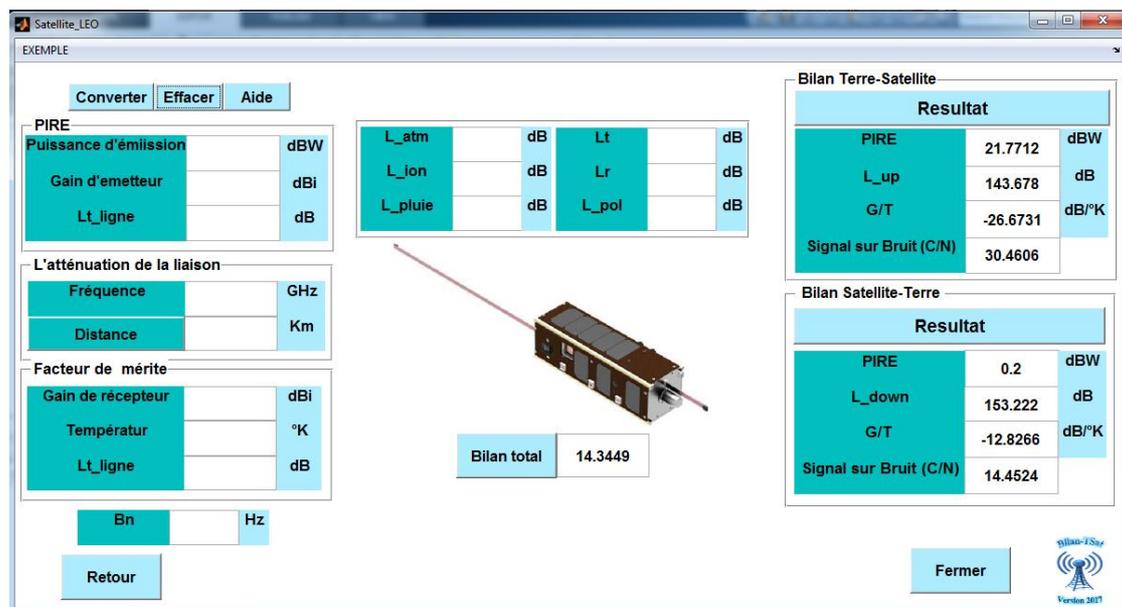


Figure III.31 Bilan de liaison total de satellite Alsat-1N

➤ Geostationary Earth Orbit (GEO)

Pour le dernier cas nous avons choisi le type GEO puis nous avons appuyé sur le bouton « OK » on obtient une nouvelle interface graphique (Figure III.32).

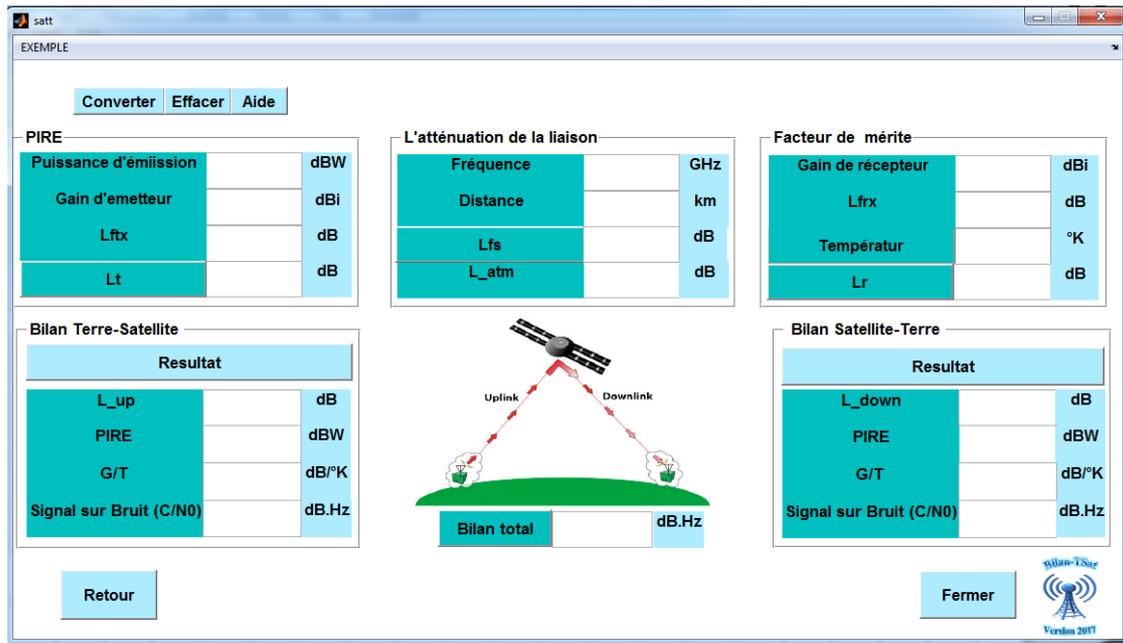


Figure III.32 Interface satellite GEO

- **Bilan de liaison de la voie montante pour le satellite GEO**

Le tableau suivant montre les différentes caractéristiques d'une liaison montant d'un satellite GEO.

Paramètre	Valeurs	Unités
Station Sol		
Puissance de transmission (Pe)	100	Watts
Gain d'antenne(Ge)	53.14	dBi
Pertes entre amplificateur et antenne station sol (Lftx)	0.5	dB
Fréquence	14	GHz
Diamètre de l'antenne	4	M
Angle d'ouverture de l'antenne tita 3Db	0.375	°
Erreur de pointage (tita)	0.1	°
Pertes de pointage Lt	0.85	dB
PIRE	71.79	dBW

Liaison Montante			
Distance	40000		Km
Pertes en espace libre	207.4		dB
Pertes atmosphériques Avec pluie et sans pluie	0.3	10.3	dB
Lup	207.7	217.7	dB
Satellite			
Gain	38.2		dB
Pertes entre antenne et récepteur (Lfrx)	1		dB
Température de l'antenne Ta	290		°k
Température du feeder Tf	290		°k
Facteur de bruit	3		dB
Température thermodynamique T0	290		°k
Température a l'entrée du récepteur	288		°k
Température de bruit du système	578.6		°k
Perte de pointage	3		dB
G/T	6.6		dB/°k
C/N0	99.2	89.2	dB.Hz

Tableau III.11 Caractéristique pour la voie Montante GEO

✓ **Etude sans la pluie**

Au premier temps on fait le calcul de bilan de liaison d'un satellite GEO, à condition d'éliminé l'effet de la pluie. Les résultats est comme suites :

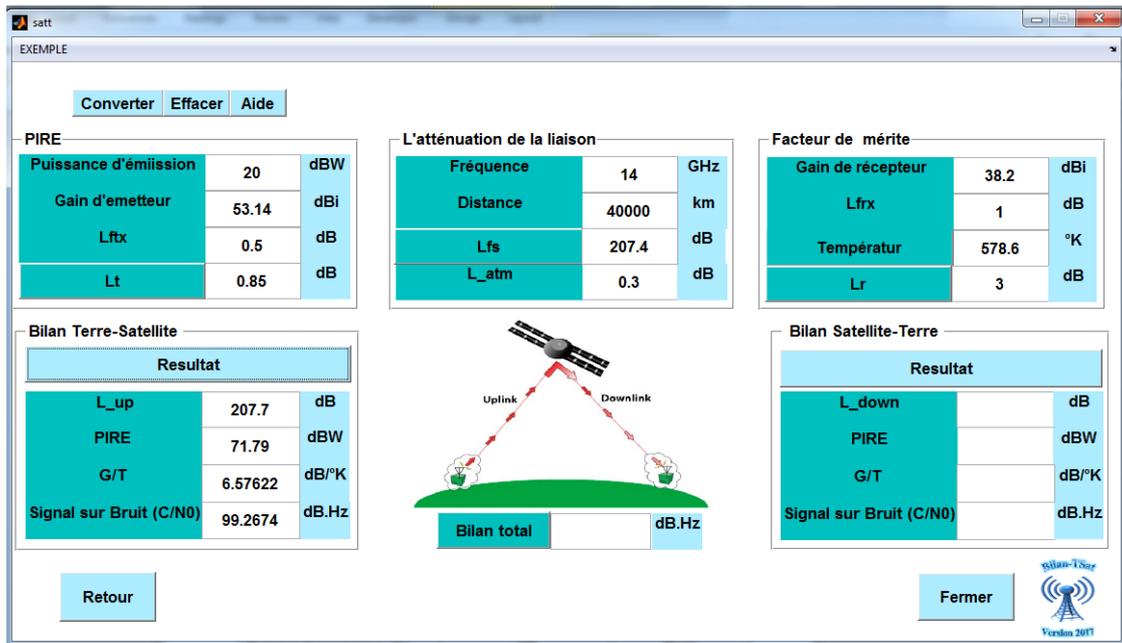


Figure III.33 Bilan de Liaison montante d'un satellite GEO sans la pluie

✓ Etude avec la pluie

Au deuxième temps on fait le calcul de bilan de liaison d'un satellite GEO avec la pluie. Les résultats est dans la figure suivante :

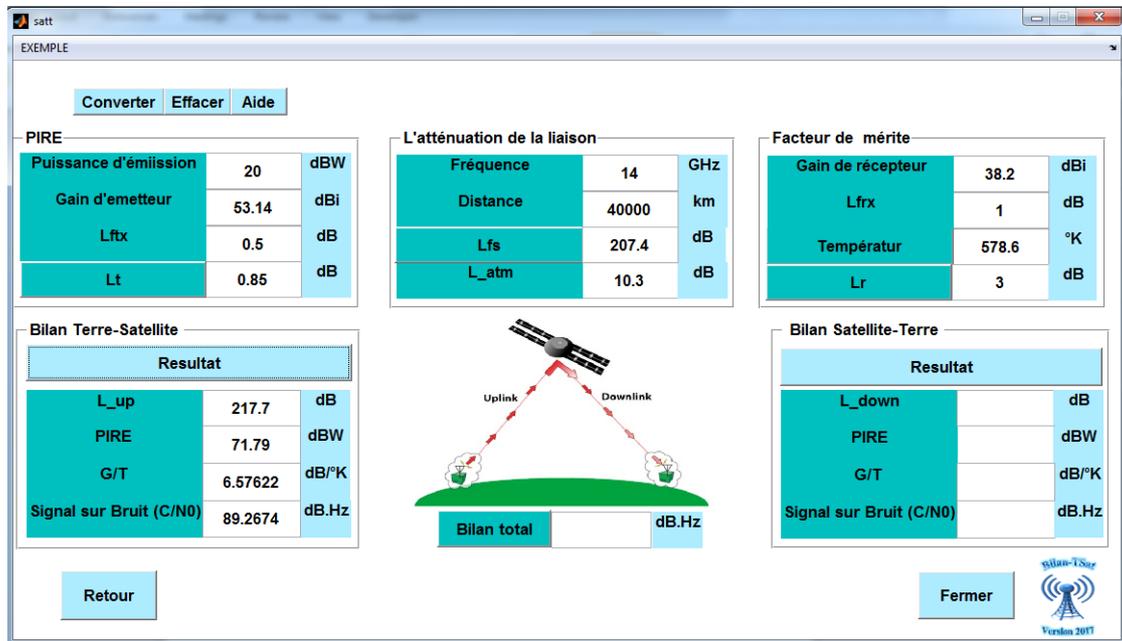


Figure III.34 Bilan de Liaison montante d'un satellite GEO avec la pluie

• **Bilan de liaison de la voie descendante pour le satellite GEO**

Le tableau suivant montre les différentes caractéristiques d'une liaison descendante d'un satellite GEO.

Paramètre	Valeurs		Unités
Station Sol			
Puissance de transmission (Pe)	10		Watts
Gain d'antenne(Ge)	38.22		dB
Pertes entre amplificateur et antenne station sol (Lftx)	1		dB
Pertes de pointage Lt	3		dB
PIRE	44.22		dBW
Liaison Montante			
Fréquence	12		GHz
Distance	40000		Km
Pertes en espace libre	206.1		dB
Pertes atmosphériques Avec pluie et sans pluie	0.3	7.3	dB
Lup	206.4	213.4	dB
Satellite			
Gain	51.8		dB
Pertes entre antenne et récepteur Lfrx	0.5		dB
//	Ciel clair	pluie	//
Température de sol	45		°k
Température du ciel	20		°k
Température équivalente du milieu	//	275	°k
Atténuation due à la pluie	//	7	dB
Température de l'antenne Ta	65	269	°k

Température du feeder Tf	290		°k
Facteur de bruit	1		dB
Température thermodynamique T0	290		°k
Température à l'entrée du récepteur Tr	75		°k
Température de bruit du système	164.5	346.5	°k
Diamètre	4		M
Angle d'ouverture de l'antenne tita 3dB	0.4		°
Erreur de pointage (tita)	0.1		°
Perte de pointage (Lr)	0.6		dB
G/T	28.5	25.3	dB/°k
C/N	94.9	84.7	dB.Hz

Tableau III.12 Caractéristique pour la voie descendante GEO

✓ **Etude sans la pluie**

Pour le calcul de bilan de liaison descendante, on élimine en premier temps la pluie.

Les résultats de calcul sans pluie est comme suite :

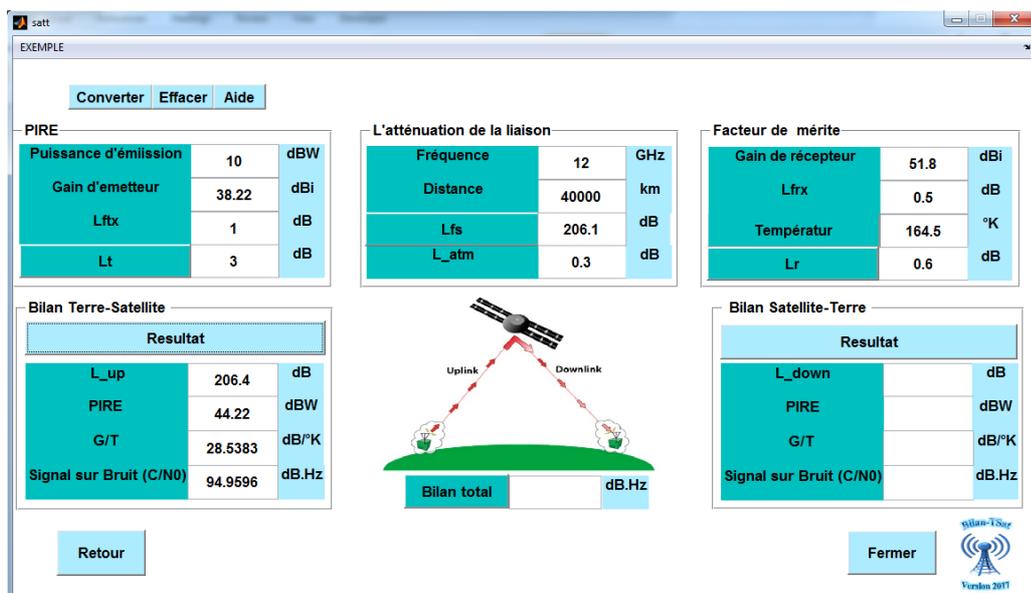


Figure III.35 Bilan de Liaison descendante sans la pluie

✓ **Etude avec la pluie**

Pour le calcul de bilan de liaison descendante, on ajoute la pluie. Les résultats de calcul avec la pluie est comme suite :

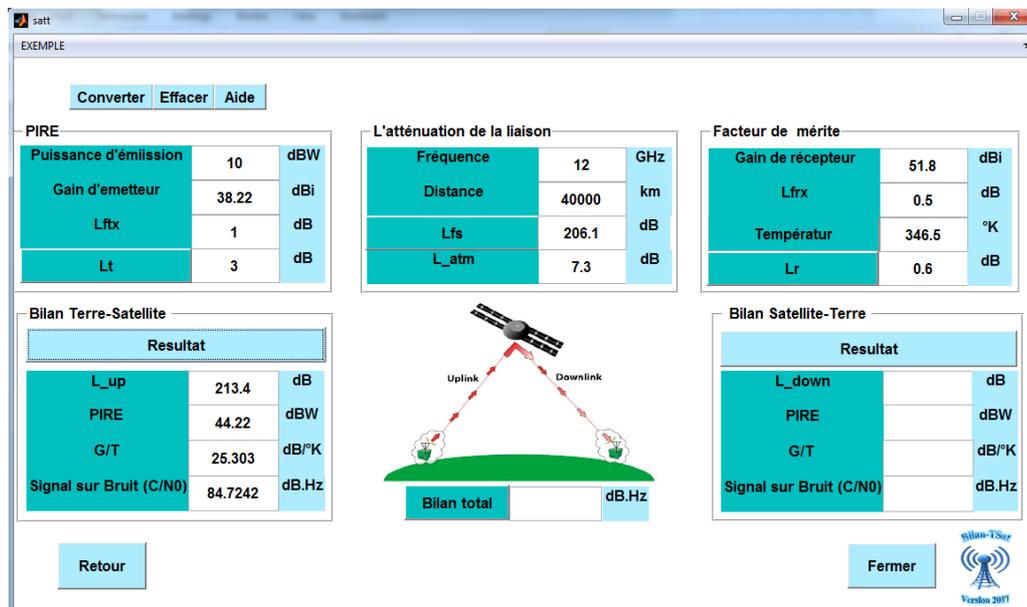


Figure III.36 Bilan de Liaison descendante avec la pluie

✓ **Total**

Le tableau suivante contient les résultats de rapport C/N dans les deux cas (avec et sans la pluie) dans le cas d'un satellite GEO.

//	Sans pluie	Avec pluie
C/N0 Uplink	99.2674	89.2674
C/N0 Dowlink	94.9596	84.7242
C/N0 total	93.5896	83.4167

Tableau III.13 Bilan de liaison total d'un satellite GEO

✓ **Etude sans la pluie**

La figure ci-dessous illustre les résultats finals de bilan de liaison d'un satellite GEO dans le cas sans la pluie.

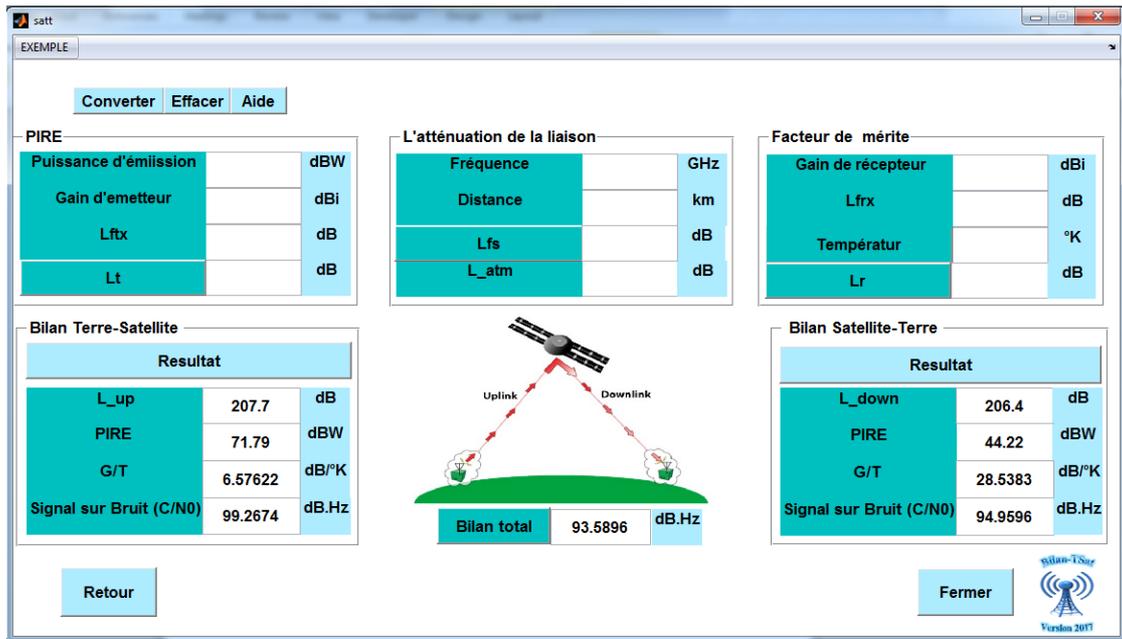


Figure III.37 Bilan de liaison total de satellite GEO sans la pluie

✓ Etude avec la pluie

La figure ci-dessous illustre les résultats finals de bilan de liaison d'un satellite GEO dans le cas avec la pluie.

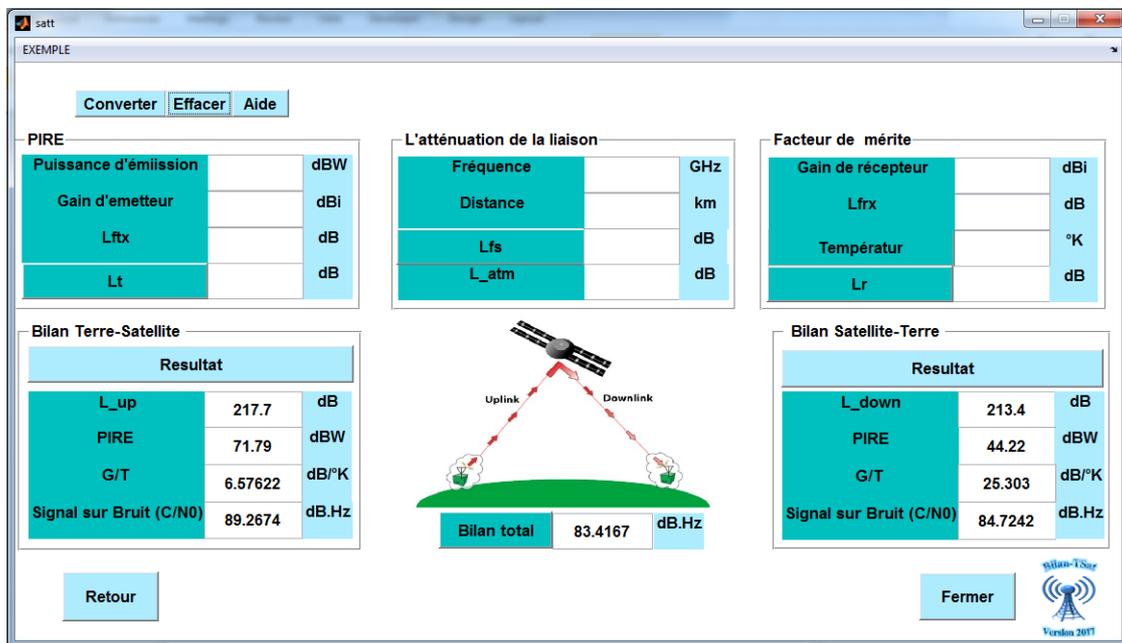


Figure III.38 Bilan de liaison total d'un satellite GEO avec la pluie

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé le bilan de liaison dans la cas d'un système de transmission par faisceau hertzien FH. Nous avons calculé la puissance reçu dans un milieu avec et sans obstacles, et nous avons déterminé la valeur du rayon de la zone de Fresnel. Le formalisme de calcul est basé sur l'introduction de tous les effets d'atténuations sur la puissance reçu. Plusieurs exemples de cas pratiques ont été étudiés et analysés.

CONCLUSION GENERAL

Au cours de ce projet de fin d'étude, nous avons développé un outil de calcul de bilan de liaison terrestre dans un environnement avec et sans obstacles, que soit dans le cas terrestre ou satellitaire.

Nous avons étudié différents types d'atténuations ce qui nous a permis d'introduire un formalisme rigoureux du bilan de liaison permettant un calcul efficace de la puissance reçue par le récepteur. En effet, ces atténuations ou pertes sont dépendants de la fréquence, de la taille et de la géométrie des obstacles et de la nature des matériaux, ce qui influe considérablement sur le calcul du bilan de liaison. Les résultats obtenus ont été comparés et validés avec la littérature.

L'interface graphique réalisé au cours de ce projet de fin d'étude peut être encore améliorée en introduisant d'autres types d'atténuations et peut être étendue à d'autres applications de liaisons radio.

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'enrichir notre connaissance dans le domaine des systèmes de télécommunications.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L.Laynier, «Liaisons hertziennes 1,» . Available: <http://www.louisreynier.com/fichiers/Liaison%20hertzienne%201.pdf>.
- [2] Y. M. ADOUM, «Etude et mise en service de la liaison faisceau hertzien Loumbila-Kamboincè au Burkina Faso,» Institut supérieur d'informatique et de gestion (ISIG) , 2009. [En ligne]. Available: http://www.memoireonline.com/02/12/5364/m_tude-et-mise-en-service-de-la-liaison-par-faisceau-hertzien-Loumbila-Kamboince-au-Burkina-Faso15.html .
- [3] A. Nlandu, «Etude d'un réseau de transmission d'information par faisceau hertzien entre deux ports de la province du bas- Congo. Cas de port de Matadi et Boma en RDC,» 2012. Available: http://www.memoireonline.com/10/13/7633/m_Etude-d-un-reseau-de-transmission-d-information-par-faisceau-hertzien-entre-deux-ports-de-la-provin19.html.
- [4] B. S. Jamel, «Systèmes de communication,» Décembre 2014. Available: http://www.isetn.rnu.tn/archives/fr/images/documents/cours/sys_comm.pdf.
- [5] Y. M. ADOUM, «à%otude et mise en service de la liaison par faisceau hertzien Loumbila- Kamboincè au Burkina Faso,» 2009. Available: http://www.memoireonline.com/02/12/5364/m_tude-et-mise-en-service-de-la-liaison-par-faisceau-hertzien-Loumbila-Kamboince-au-Burkina-Faso18.html.
- [6] M. Germain, «Les bases de la radio,» 2012. Available: <https://www.forumaterna.org/files/livresblancs/IntroductionALaradio.pdf>.
- [7] «Description des bandes de fréquences,» 2016. Available: <http://www.futura-sciences.com/tech/definitions/tech-bande-frequences-1128/>.
- [8] A. Nlandu, «Etude d'un réseau de transmission d'information par faisceau hertzien entre deux ports de la province du bas- Congo. Cas de port de Matadi et Boma en RDC,» 2012. Available: http://www.memoireonline.com/10/13/7633/m_Etude-d-un-reseau-de-transmission-d-information-par-faisceau-hertzien-entre-deux-ports-de-la-provin20.html.
- [9] «LES FAISCEAUX HERTZIENS,». Available: <https://fr.scribd.com/doc/52496989/COURS-DE-FH>.
- [10] G. Akpaki, «Transmission d'un signal audio-vidéo fréquence par faisceau hertzien et par satellite (cas de l'ORTB),» Institut Cerco, 2009.
- [11] «LES ANTENNES DE TÉLÉCOMMUNICATION,». Available: <http://kiprotech.oxatis.com/PBCPPlayer.asp?ID=1449470>.
- [12] A. Boyer, «ANTENNES,» Octobre 2011. Available: http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/cours_antennes_oct11_v4_5RT.pdf.
- [13] «LES ANTENNES DE TÉLÉCOMMUNICATION,» [En ligne]. Available: <http://kiprotech.oxatis.com/PBCPPlayer.asp?ID=1448948>.
- [14] «Doublet demi-onde,». Available: <http://f5zv.pagesperso->

- orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08G01.html.
- [15] «L'antenne Yagi-Uda : généralités,». Available: <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08y/RM08y00.html>.
- [16] P. J. Q. F6EVT, «Antenne Cornet Pyramidal Optimum,» [En ligne]. Available: http://www.f6evt.fr/f6evt_fr/antenne-cornet-pyramidal.pdf.
- [17] «Antenne parabolique,». Available: http://www.wikiforhome.org/fr/index.php/Antenne_parabolique.
- [18] C. Yasmine, «Les satellites,» [En ligne]. Available: <http://www.arago-perpignan.fr/images/stories/Viepedagogique/SVT/2016toulouse/Articleledesvt.pdf>.
- [19] G. Menudier, «Caractérisation des performances d'antenne à réflecteurs paraboliques illuminé par une source fodale BIE application a l'optimisation d'une couverture multi-média multi-faisceau,» 16 octobre 2007.
- [20] «Communication par satellites,» 2016. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Satellite_de_t%C3%A9l%C3%A9communications.
- [21] J. M. MATHIEU, «TRANSMISSIONS SPATIALES,» 2007. Available: <https://passiontelecom.files.wordpress.com/2013/01/satellite-chap-1.pdf>.
- [22] «Système satellitaire,». Available: <http://www.mongosukulu.com/index.php/en/contenu/informatique-et-reseaux/telecommunications/707-systeme-satellitaire?showall=&start=2>.
- [23] «Les orbites,» 2008. [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite>.
- [24] *Document de la station sol Alsat-1N.*
- [25] «Étudier les différentes orbites terrestres,». Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite_terrestre_moyenne.
- [26] R. I.-R. P.341-6, «The concept of transmission,» Aout 2016. [En ligne]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.341-6-201609-I!!PDF-E.pdf.
- [27] «Atténuation,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Atténuation>.
- [28] D. Grenier, «Antennes et propagation radio,» 2017. Available: http://w3.gel.ulaval.ca/~dgrenier/ap_notes-e.pdf.
- [29] A. Boyer, «Dimensionnement de réseau cellulaire WCDM,» Toulouse, 2014. Available: http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/4IR-BE_dimensionnement_interface_radio_2014.pdf.
- [30] R. I.-R. P.840-6, «Attenuation due to clouds and fog,» 2013. [En ligne]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-6-201309-I!!PDF-E.pdf.
- [31] R. I.-R. P.676-11, «Attenuation by atmospheric gases,» 2016. [En ligne]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-I!!PDF-E.pdf.
- [32] R. U.-R. P.676-3, «AFFAIBLISSEMENT DÛ AUX GAZ DE L'ATMOSPHÈRE,» (1990-1992-1995-1997). [En ligne]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-3-199708-S!!PDF-F.pdf.
- [33] R. I.-R. P.838-3, «Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,»

- (1992-1999-2003-2005). Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf.
- [34] M. Terré, «Propagation,» 2005-2006. Available: http://easytp.cnam.fr/terre/images/CoursB8_V7_Propagation.pdf.
- [35] «NOTION D'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION POUR,» RECOMMANDATION UIT-R P.341-5, 1999. [En ligne].
- [36] «Atténuation,» wikipedia.org, 28 2 2017. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Att%C3%A9nuation>.
- [37] A. Boyer, «CANAUX DE TRANSMISSIONS,» INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE , 09 2011. Available: http://alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/cours_transmission_bruite_sept11_v2_sans_reponses.pdf.
- [38] M.Meriah, «Liaison hertzienne,» Université de Tlemcen, 2016-2017.
- [39] L. REYNIER, «BILAN DE LIAISON HERTZIENNE. Bilan de liaison,» [En ligne]. Available: <http://perso.telecom-paristech.fr/~coupecho/cours/BdL-TDMA-CDMA-OFDMA-4p.ppt.pdf>.
- [40] Mr ZEMAM Youssouf et Mr SAHLI Omar, «Etude de la liaison BTS/BSC du réseau GSM,» Université de tlemcen, mai 2012-2013.
- [41] Charles, GASHABUKA S. Aimable et KABIRI, «ETUDE DES POSSIBILITES D'UTILISATION D'UN REFLECTEUR PASSIF SUR UNE LIAISON NUMERIQUE DE GRANDE CAPACITE,» UNIVERSITE NATIONALE DU RWANDA, 10 2006.
- [42] «Ellipsoïde de Fresnel,» wikipedia. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Ellipso%C3%AFde_de_Fresnel. [Accès le 9].
- [43] Chahrazad, ACHACHI Asma et ELHADJ MIMOUNE, «Etude des atténuations dans une liaison radio et Calcul du bilan de,» Université de Tlemcen, mai 2016.
- [44] «ÉLÉMENTS DE BASE DES COMMUNICATIONS PAR,» Département du génie électrique et génie informatique.Ecole Polytechnique Montréal, juin 2007. Available: <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00156394/file/cours.pdf>.
- [45] M.Bekhti, «Cours Liaison satellite,» Oran, 07 03 2017.
- [46] M. F4BUC, «Les systèmes de pointage et,» . Available: http://f4buc.pagesperso-orange.fr/Articles/article_LAF_sys_poursuite.PDF.