



Mémoire

A L'UNIVERSITÉ DE TLEMCEM FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

LABORATOIRE DE TELECOMMUNICATIONS DE TLEMCEM LTT

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : " Réseaux et Systèmes de Télécommunications"

Présenté par :

BELLIL Moulay Idriss

Développement d'un outil de calcul du bilan de liaison pour système de transmission par Faisceau Hertzien

Soutenu en Juin 2015 devant le Jury :

Mr MERAD Lotfi	MCA à l'Ecole Préparatoire ST de Tlemcen	Président
Mr BOUSSAHLA Miloud	MCB à l'université de Tlemcen	Examineur
Mr DERRAZ Foued	MCB à l'université de Tlemcen	Examineur
Mr MERIAH Sidi Mohammed	Professeur à l'université de Tlemcen	Encadrant

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur MERIAH S. M. Professeur à l'université de Tlemcen et responsable du laboratoire LTT, pour l'orientation et l'encadrement de ce projet de fin d'études.

Je tiens à remercier Monsieur MERAD Lotfi, MCA à l'école préparatoire ST de Tlemcen qui a bien voulu accepter de présider ce jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur BOUSSAHLA Miloud, MCB à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de faire partie des examinateurs.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur DERRAZ Foued, MCB à l'université de Tlemcen, pour sa présence parmi les examinateurs.

Résumé

Lors de la planification d'une liaison radio, il y a nécessité de passer par la modélisation des éléments qui influencent la propagation Radio-Fréquence. Afin d'assurer une bonne précision, certains modèles nécessitent l'utilisation d'un ensemble de données et d'une procédure de calcul relativement complexe. Des modules software en plus d'une application graphique ont été créés en se basant sur les modèles théoriques, empiriques et stochastiques proposés par des organisations internationales telle que l'ITU. L'outil est capable d'extraire un nombre important d'informations basées sur les modèles du gaz, de la pluie, du brouillards, la végétation et l'espace libre telles que : les pertes, la longitude relative et l'angle réelle de transmission. L'application peut être largement améliorée pour introduire les évanouissements rapides et d'autres modèles. Le code source peut aussi être optimisé et documenté.

Mots-clés : système de télécommunication, faisceau hertzien, bilan, liaison, modèle, pertes de liaison, programmation, python, interface graphique.

Abstract

When planning a radio link, elements that influence the Radio Frequency propagation must be modeled. In order to ensure a good accuracy, some models require the use of a data set and a relatively complex calculation procedures. Software modules in addition to a graphical user interface were created based on theoretical, empirical and stochastic models recommended by international organizations such as the ITU. The tool is able to extract a large amount of information based on gases, rain, fog, vegetation and free-space models such as: loss, the relative longitude and actual transmission angle. The application can be greatly improved to introduce fast fading in addition to other models. The source code can also be optimized and documented.

Keywords: telecommunications system, microwave system, budget, connection, model, link loss, programming, python, GUI.

ملخص

التحضير لإنشاء نظام اتصالات لاسلكية يتطلب نمذجة العناصر المؤثرة على جودتها. من أجل ضمان دقة جيدة بعض النماذج تتطلب استخدام مجموعة من البيانات بالإضافة إلى إجراء حسابات معقدة. وحدات برمجية و تطبيق بواجهة رئيسية تم إنشاؤها بناء على النماذج النظرية، التجريبية والعشوائية المقترحة من طرف منظمات دولية مثل الاتحاد الدولي للاتصالات. الأداة قادرة على استخراج كمية كبيرة من المعلومات استنادا إلى نماذج الغاز، المطر، الضباب والغطاء النباتي بما فيها النقص الاجمالي في الطاقة عند المستقبل، زاوية الارسال الحقيقية والفرق بين خطي الطول للمرسل والمستقبل النسبي. يمكن تطوير البرنامج لتمكينه من الأخذ بعين الاعتبار للنقص العشوائي في الطاقة، إضافة نماذج أخرى، تحسين كيفية عمله و طريقة حسابه بالإضافة إلى تقديم شروحات حول تصميمه و كيفية استعماله.

كلمات مفتاحية : اتصال، ارسال، بث، أثر، تردد، برنامج، نموذج، واجهة رئيسية.

Table des matières

Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	iv
ملخص.....	iv
Liste des illustrations.....	vii
Liste des Tables.....	viii
Liste des acronymes.....	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Introduction aux systèmes de transmission RF.....	2
1.1.Introduction.....	2
1.2.Le domaine RF.....	2
1.2.1.Les désignations fréquentielles.....	2
1.2.2.Les modes de propagation.....	3
1.2.2.1.La propagation LOS et l'horizon radio.....	3
1.2.2.2.Propagation non-LOS.....	6
1.2.2.3.Les effets de propagation comme fonction de la fréquence.....	6
1.2.3.Pourquoi modéliser la propagation ?.....	7
1.2.4.Le choix du modèle.....	7
1.3.Les antennes.....	7
1.3.1.Les paramètres des antennes.....	8
1.3.1.1.Le dipôle demi-onde.....	10
1.3.1.2.L'antenne Yagi.....	11
1.3.1.3.L'antenne corné.....	11
1.3.1.4.Antennes à réflecteur.....	11
1.3.1.5.Réseaux d'antennes.....	12
1.3.1.6.Autres types d'antennes.....	13
1.4.Systèmes de transmission FH.....	13
1.5.Caractéristiques du bilan de liaison.....	15
1.5.1.Perte totale.....	15
1.5.2.Perte du système.....	15
1.5.3.Perte de transmission de la liaison radio.....	16
1.5.4.Perte de transmission basique.....	16
1.5.5.Perte dans l'espace libre basique.....	16
1.5.6.Perte directe de chemin de transmission.....	16
1.5.7.Perte relative à celle en espace libre.....	17
1.6.Conclusion.....	18
Chapitre 2: Modèles de propagation RF.....	19
2.1.Introduction.....	19
2.2.Modélisation de l'atmosphère.....	19
2.2.1.La référence d'atmosphères standards.....	19
2.2.2.L'indice de réfraction.....	19
2.3.Propagation dans les milieux internes.....	20
2.3.1.Particularités et mesures de qualité.....	21
2.3.2.Modèle de perte de parcours.....	21

2.3.3.Des modèles spécifiques.....	23
2.4.Atténuation due aux gaz.....	23
2.4.1.L'atténuation spécifique.....	23
2.4.2.Atténuation du parcours.....	25
2.4.2.1.Chemin terrestre.....	25
2.4.2.2.Chemin incliné.....	25
2.5.Atténuation dans la végétation.....	28
2.5.1.Chemin incliné.....	30
2.6.Modèle d'atténuation pour la pluie.....	30
2.7.Atténuation due aux brouillards.....	32
2.7.1.Coefficient de l'atténuation spécifique.....	33
2.8.Conclusion.....	34
Chapitre 3: L'application linkb.....	35
3.1.Introduction.....	35
3.2.Le choix du langage et de la plate-forme.....	35
3.3.Organisation des modèles.....	37
3.4.Organisation de l'interface graphique.....	40
3.5.Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	46
Références.....	47
Annexe A: Référence d'atmosphères standards.....	48
A.1.Petite latitude $<22^\circ$	48
A.2.Latitude moyenne [22° , 45°].....	48
A.2.1..été.....	48
A.2.2..hiver.....	49
A.3.Grande latitude $>45^\circ$	50
A.3.1..été.....	50
A.3.2..hiver.....	50
Annexe B: Calcul de la pression de vapeur d'eau.....	52
Annexe C: Les valeurs des différents coefficients du modèle Indoor.....	54
Annexe D: La partie imaginaire dépendante de la fréquence de la réfractivité complexe.....	57

Liste des illustrations

Illustration 1.1: Référence des distances.....	5
Illustration 1.2: Régions de rayonnement d'une antenne.....	10
Illustration 1.3: La structure de l'antenne Yagi.....	11
Illustration 1.4: Configuration de l'antenne Cassegrain.....	12
Illustration 1.5: Système de transmission FH.....	13
Illustration 1.6: Différents termes utilisés dans le bilan de liaison.....	15
Illustration 1.7: Différents facteurs dans un bilan de liaison.....	17
Illustration 2.1: Atténuation spécifique due aux gaz atmosphériques.....	23
Illustration 2.2: Atténuation maximale due aux gaz atmosphériques.....	24
Illustration 2.3: Atténuation spécifique aux altitude indiquées.....	25
Illustration 2.4: La référence utilisée pour les couches.....	28
Illustration 2.5: Distance à travers la forêt.....	29
Illustration 3.1: Le logo de Kivy.....	36
Illustration 3.2: Le logo de Python.....	37
Illustration 3.3: Organisation des modèles.....	37
Illustration 3.4: La structure de la classe principale.....	40
Illustration 3.5: La structure des classes élémentaires de l'interface.....	41
Illustration 3.6: Les champs d'entrée dans le cas Outdoor.....	42
Illustration 3.7: Entrées et Résultats du cas Outdoor.....	42
Illustration 3.8: La partie About de l'application.....	43
Illustration 3.9: Les champs d'entrée dans le cas Indoor.....	43
Illustration 3.10: Le bouton Exit dans l'application.....	44
Illustration 3.11: Les entrées et les résultats du cas Indoor.....	44

Liste des Tables

Table 1.1: Désignations fréquentielles.....	2
Table 1.2: Désignations fréquentielles ITU.....	3
Table 2.1: Services typiques et problèmes associés.....	22
Table 2.2: Exemples de paramètres mesurés devant St. Petersburg.....	29
Table 2.3: Coefficients pour KH.....	31
Table 2.4: Coefficients pour KV.....	31
Table 2.5: Coefficients pour αV	31
Table 2.6: Coefficients pour αH	32
Table C.1: Coefficient de perte de puissance.....	54
Table C.2: Facteur de pénétration du plafond.....	55
Table C.3: Statistiques des évanouissements rapides.....	55
Table D.1: Données spectroscopique de l'oxygène.....	60
Table D.2: Données spectroscopiques de la vapeur d'eau.....	61

Liste des acronymes

AM	Amplitude Modulation
CB	Citizens Band
EHF	Extra High Frequency
ELF	Extremely Low Frequency
FH	Faisceau Hertzien
FM	Frequency Modulation
FRS	Family Radio Service
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication
LF	Low Frequency
LOS	Line Of Sight
MF	Medium Frequency
MMW	Millimeter-Wave
Q4	Quarter 4
Radar	RAdio Detection And Ranging
RF	Radio Frequency
SHF	Super High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
US	United States

UTD	Uniform Theory of Diffraction
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
WLAN	Wireless Local Area Network
WPBX	Wireless Private Branch EXchange

Introduction générale

Les télécommunications modernes sont une des applications de la théorie de l'électromagnétisme. En US le nombre des abonnés mobiles a dépassé 100 % de la population en Q4 2010 [1]. Toujours en US, les revenus des données mobiles sont apparues en 2004 et ont dépassé les revenus de la voix en 2013 [1]. Sans doute, les communications spatiales doivent être sans fils. Du point de vu technique et pour tout les exemples présentés, un système d'émission et de réception doit être réalisé après une conception. La théorie de l'électromagnétisme n'est plus suffisante pour la conception à cause de la nature complexe et aléatoire des environnements, c'est la raison pour laquelle, une modélisation empirique et/ou aléatoire doit être utilisée pour remplacer ou compléter les modèles théorique qui existent déjà. Un nombre important de modèles a été développé par des chercheurs, organisations et sociétés. Cependant, certains modèles sont relativement complexes afin d'assurer une bonne précision, cela rend l'utilisation manuelle de ces modèles difficile ou impossible. L'ITU-R à titre d'exemple offre des centaines de modèles. Par conséquent il y a nécessité d'orienter une partie des projets vers la transformation de ces modèles en des modules, Packages et classes. Les développeurs des applications destinées à toutes les plate-formes peuvent utiliser ces Packages pour la réalisation des applications qui peuvent réaliser ou faciliter l'étude et la planification des liaisons FH. Ce manuscrit présente un exemple de ces applications, des Packages Python et Java ont été réalisés pour 5 modèles offerts par l'ITU-R en plus d'une simple interface graphique pour l'utilisation de ces modèles.

Le chapitre 1 rappelle les notions élémentaires de l'électromagnétisme, il présente la propagation RF, les antennes et le système de transmission FH ainsi que les différentes caractéristiques du bilan de liaison.

Le chapitre 2 présente les modèles utilisés pour l'application prises de l'ITU-R. il présente une modélisation des paramètres de l'atmosphère, puis donne des modèles pour les gaz, la végétation, la pluie, les brouillards et les milieux internes.

Le chapitre 3 présente une description sur le programme (les modules de calcul et l'interface), son organisation et un petit manuel d'utilisation.

Ce projet de fin d'étude peut être un point de départ pour des travaux qui peuvent simplifier la planification et l'étude des systèmes de transmission Radio-Fréquence basés sur la création des outils software.

Chapitre 1: Introduction aux systèmes de transmission RF

1.1 Introduction

Il est important de rappeler les notions élémentaires sur la théorie de l'électromagnétisme, la propagation RF, les antennes et le système de propagation RF. Le présent chapitre représente une référence de la terminologie utilisée dans ce manuscrit.

1.2 Le domaine RF

Les bases de la propagation en espace libre sont les mêmes quelque soit la fréquence. Mais réellement, les applications sont très sensibles aux fréquences utilisées. RF est le domaine des fréquences situées entre 1MHz et 300GHz [2]. D'autres ressources définissent le domaine RF par l'intervalle allant de 1MHz à 1GHz, tandis que les fréquences allant de 1GHz à 30GHz par le domaine micro-ondes et celles allant de 30GHz à 300GHz porte le nom ondes millimétriques ou MMW [2].

1.2.1 Les désignations fréquentielles

Le spectre électromagnétique est divisé en plusieurs régions comme le montre la table 1.1. Durant la 2^{ème} guerre mondiale, des lettres ont été utilisées pour désigner les différentes bandes fréquentielles pour les applications RADAR. Ces désignations sont toujours utilisées. Les identifiants des bandes peuvent être utilisés pour référencer un ou plusieurs intervalles de fréquences[2].

Bande	Désignation	intervalle de fréquence
Extremely low frequency	ELF	<3 kHz
Very low frequency	VLF	3–30 kHz
Low frequency	LF	30–300 kHz
Medium frequency	MF	300 kHz–3 MHz
High frequency	HF	3–30 MHz
Very high frequency	VHF	30–300 MHz
Ultra-high frequency	UHF	300 MHz–3 GHz
Super-high frequency	SHF	3–30 GHz
Extra-high frequency	EHF	30–300 GHz

Table 1.1: Désignations fréquentielles

La table 1.2 montre les désignations des bandes nominales et celles des bandes RADAR officielles comme le recommande l'ITU. La modélisation de la propagation RF est caractérisée par le nombre important des modèles qui sont en développement continu.

La majorité des modèles qui existent sont de natures empiriques, malgré qu'ils sont basés sur la physique. Le type complexe des environnements rend difficile (ou impossible) la création des modèles exactes[2].

Notation	Intervalle de fréquence nominal	ITU—Région 2
HF	3–30 MHz	
VHF	30–300 MHz	138–145, 216–225 MHz
UHF	300–1000 MHz	420–450, 890–942 MHz
L	1–2 GHz	1215–1400 MHz
S	2–4 GHz	2.3–2.5, 2.7–3.7 GHz
C	4–8 GHz	5.25–5.925 GHz
X	8–12 GHz	8.5–10.68 GHz
Ku	12–18 GHz	13.4–14, 15.7–17.7 GHz
K	18–27 GHz	24.05–24.25 GHz
Ka	27–40 GHz	33.4–36 GHz
R	26.5–40 GHz	
Q	33–50 GHz	
V	40–75 GHz	
W	75–110 GHz	

Table 1.2: Désignations fréquentielles ITU

1.2.2 Les modes de propagation

La propagation de l'onde électromagnétique est décrite par les équations de Maxwell, qui montrent qu'une variation temporaire du champ électrique (ou un courant de conduction) crée une variation spatiale du champ magnétique, une variation temporaire du champ magnétique produit une variation spatiale du champ électrique. Pour la majorité des modélisations de la propagation RF, il est suffisant de visualiser l'onde électromagnétique par le vecteur de Poynting dans la direction de propagation[2].

1.2.2.1 La propagation LOS et l'horizon radio

En espace libre, les ondes électromagnétiques sont modélisée par une propagation externe par rapport à la source et à partir de cette dernière vers toutes les directions, dans ce cas l'onde est dite sphérique et la source est appelée isotropique¹. Quand la distance entre le point d'observation et la source devient importante, l'onde sphérique peut être assimilée à une onde plane sur une surface d'étude finie. La direction de propagation est déterminée par le résultat du produit vectoriel entre le champ électrique et

¹ Ce type des sources n'existe pas réellement, mais son utilisation simplifie considérablement l'étude des systèmes de transmission

le champ magnétique. La polarisation de l'onde est définie par l'orientation du plan contenant les composantes du champ électrique. Idéalement, la polarisation de l'antenne de réception doit être exactement la même que celle de l'onde reçue et la polarisation de l'onde émise est la même de celle de l'antenne d'émission[2].

$$P = E \times H \quad (1.1)$$

Ce produit vectoriel est appelé le vecteur de Poynting. Quand le vecteur de Poynting est divisé par l'impédance caractéristique de l'espace libre, le vecteur résultant donne la direction de propagation et la densité de puissance.

La densité de puissance au niveau de la surface imaginaire entourant la source RF peut être exprimée comme :

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \text{ W/m}^2 \quad (1.2)$$

Avec d étant le diamètre de la sphère imaginaire, S est la densité de puissance au niveau de la surface de la sphère en W/m^2 .

La densité de puissance d'une onde électromagnétique est inversement proportionnelle à d^2 . Si une ouverture fixe est utilisée pour collecter l'énergie électromagnétique au point de réception alors la puissance reçue sera aussi inversement proportionnelle à d^2 . La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dépend du milieu, en espace libre elle est approximativement égale à $c = 3 \times 10^8$ m/s. La vitesse de propagation dans l'air est proche de celle de espace libre, c'est la raison pour laquelle la même valeur est utilisée généralement. La longueur d'onde électromagnétique est définie comme la distance traversée par l'onde sur une période, elle est notée par : $\lambda = \frac{c}{f}$

L'unité de la longueur d'onde est le mètre ou tout autre unité de distance. Lors d'une propagation LOS, il est nécessaire de prendre en considération la forme sphérique de la terre. Cette dernière caractéristique est une limite géométrique fondamentale de la propagation LOS. Particulièrement, si la distance entre l'émetteur et le récepteur est grande par rapport à la hauteur des antennes alors la transmission LOS ne peut pas exister. Une approche simple consiste à traiter la terre comme une sphère d'un rayon équivalent égal au rayon équatorial de la terre [2].

De la géométrie :

$$d^2 + r^2 = (r+h)^2 \quad (1.3)$$

Alors :

$$d^2 = (2r + h)h \quad (1.4)$$

Et:

$$d \approx \sqrt{2rh} \quad (1.5)$$

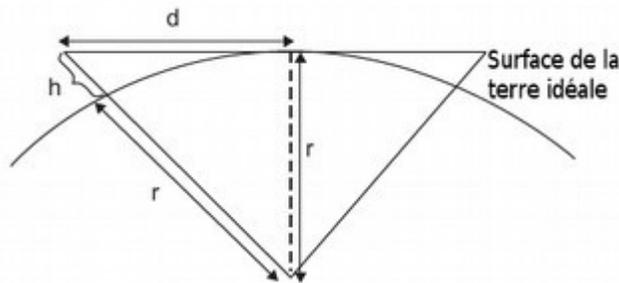


Illustration 1.1: Référence des distances

Tant que : $rh \geq h^2$.

L'illustration 1.1 a été utilisée comme référence des équations précédentes.

Le rayon de la terre est approximativement 3960 miles à l'équateur. Les ondes RF horizontales seront réfractées vers le bas dû à la variation de la densité atmosphérique en fonction de la hauteur. Par conséquent, l'approximation « 4/3 » de la terre peut être utilisée, qui consiste à multiplier le rayon de la terre par 4/3. Donc :

$$r = 5280 \text{ miles}$$

et :

$$d = \sqrt{2 \frac{4}{3} 3960 \frac{h}{5280}} \quad (1.6)$$

Ou bien :

$$d \approx \sqrt{2h} \quad (1.7)$$

Où d est la distance à l'horizon radio en miles et h est en pieds². Cette approximation donne une méthode rapide de détermination de la distance de l'horizon radio pour chaque antenne, [2] la somme de ces dernières est la distance de propagation LOS maximale entre 2 stations.

2 La transformation 5280 ft = 1 mile a été utilisée.

1.2.2.2 Propagation non-LOS

Une transmission non-LOS peut se faire si la propagation LOS n'est pas possible, cela est dû soit aux obstacles, soit à la longue distance.

Les mécanismes de propagation non-LOS varient considérablement par rapport à la fréquence utilisée. Dans les domaines VHF et UHF la propagation indirecte est souvent utilisée. Des exemples sur la propagation indirecte incluent les téléphones cellulaires, Pagers et quelques communications militaires. De même, une transmission LOS peut exister pour les derniers systèmes. Dans l'absence d'une liaison LOS, des phénomènes comme la diffraction, la réfraction, et/ou les réflexions multi-trajets dominent la propagation. La diffraction est le phénomène qui se crée sur les pointes à cause desquelles le signal se divise en une infinité de composantes qui propagent suivant toutes les directions. La réfraction est la variation de la direction de propagation lors du passage d'un milieu à un autre ou lorsqu'un signal se déplace dans un milieu inhomogène. La réflexion multi-trajets est causée par les objets environnants, plusieurs copies du même signal déphasé s'additionnent au niveau du récepteur. La propagation au-delà de l'horizon est assurée par le moyen des ondes du ciel, les ondes troposphériques, les ondes du sol. Les ondes du ciel sont basées sur la réflexion/réfraction ionosphérique, les ondes troposphériques sont des ondes électromagnétiques qui propagent à travers, et restent dans, la couche inférieure de l'atmosphère. Les ondes du sol incluent les ondes superficielles qui suivent la surface de la terre et les ondes spatiale comme la propagation directe LOS et la propagation par réflexions du sol.

1.2.2.3 Les effets de propagation comme fonction de la fréquence

Comme est déjà mentionné, les effets de la propagation RF varient considérablement avec la fréquence de l'onde. Il est intéressant de donner les applications typiques des différents intervalles de fréquences. La bande VLF qui couvre 3 – 30kHz exige des antennes très grandes afin d'atteindre une efficacité raisonnable, une règle qui stipule que l'antenne doit être de l'ordre de $\lambda/10$ peut être utilisée pour une une bonne performance ; la bande totale est sur 27kHz ce qui impose l'utilisation de bandes étroites. VLF est largement utilisée pour les communications sous-marines. Les bandes LF et MF couvrent l'intervalle 30kHz – 30MHz et utilisent la propagation superficielle et les ondes du ciel, cette bande exige aussi l'utilisation de très grandes antennes, le domaine d'application inclue la diffusion radio AM et la référence des temps³. La bande HF couvre l'intervalle 3 – 30MHz, cette bande utilise essentiellement la propagation superficielle et les ondes du ciel, la radio CB à 27MHz représente un exemple, appartenant à cette bande, d'une mauvaise réutilisation de fréquences tant qu'elle peut être écoutée sur des milliers de miles. La taille des antennes de cette bande est raisonnable. Les bandes VHF et UHF couvrent l'intervalle 30MHz – 3GHz. Dans cette bande il y a une petite propagation à travers l'ionosphère ce qui est idéal pour la réutilisation des fréquences. La transmission dans ces bandes est principalement LOS ou par réflexions du sol, la taille des antennes de cette bande est aussi raisonnable ce qui représente un bon choix pour les communications cellulaires. Le domaine d'application inclus la diffusion radio FM, la téléphonie cellulaire, FRS, pagers, le service radio

3 La référence des temps est sur 60kHz, pour les horloges automatiques atomiques.

publique comme le département de la police, GPS. À partir de ces bandes les communications satellitaires commencent. SHF s'étend de 3 à 30GHz et utilise la propagation LOS. Le domaine d'application inclus les communications satellitaires, la diffusion TV. EHF couvre les fréquences appartenant à 30 – 300GHz et sont souvent appelées ondes millimétriques. La transmission ne peut qu'une propagation LOS. La précipitation et l'atténuation dû aux gaz représentent des problèmes pour cette bande.

1.2.3 Pourquoi modéliser la propagation ?

La modélisation de la propagation a pour but de déterminer la probabilité d'avoir une performance satisfaisante des systèmes de communication. Elle est dépendante de la propagation de l'onde électromagnétique. Sachant que la qualité de la modélisation est proportionnelle à son coût, il y a un seuil minimal au dessus duquel les performances ne seront plus satisfaisantes. Par conséquent, la qualité de la modélisation doit dépendre du type de l'application. Durant la planification, la modélisation du canal de propagation a pour but la prédiction de l'intensité du signal reçu au bout de la liaison en plus d'une estimation sur les évanouissements rapides.

1.2.4 Le choix du modèle

Généralement, il est intéressant d'utiliser deux (ou plus de) modèles indépendants s'ils existent. La modélisation de la propagation doit être statistique même si l'un est assuré de donner une bonne performance. Les modèles sont généralement basés sur une très grande quantité de données collectées pour un but spécifique.

Des modèles génériques peuvent être obtenus des organisations internationales telle que l'ITU qui offre des recommandations pour la modélisation de différents types de phénomènes. Il existe aussi plusieurs module software commercial destiné à la modélisation de propagation qui utilisent des techniques de modélisation standards ou propriétaires. L'utilisateur de ces modules doit toujours savoir les limites de ces modèles.

1.3 Les antennes

Tout système sans-fil doit utiliser une antenne afin de rayonner et recevoir de l'énergie électromagnétique. L'antenne est le composant qui se situe entre le système de transmission et l'espace, elle est souvent appelée l'interface d'air. Pour plusieurs types d'antennes, il est possible d'estimer le gain à partir des dimensions physiques. Les performances de l'antenne sont les même qu'elle soit en émission ou en réception, ce principe fondamental est appelé la réciprocité des antennes, il est, donc, possible de déterminer les paramètres d'une antenne⁴ dans le cas où elle est utilisée en émission ou en réception.

4 Le gain, la largeur du lobe principal, la polarisation sont des exemples des paramètres essentiels d'une antenne.

1.3.1 Les paramètres des antennes

Une abstraction utile peut être utilisée pour l'étude des antennes, c'est la radiation isotropique qui est une antenne qui rayonne (ou reçoit) de l'énergie électromagnétique de la même façon dans toutes les directions, ce type de rayonnement est dit omnidirectionnel. La densité de puissance S de l'antenne isotropique dépend uniquement de la distance d et peut être obtenue de la puissance totale divisée par la surface de la sphère de rayon d .

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \text{ W/m}^2 \quad (1.8)$$

Donc, la puissance est uniformément distribuée sur la sphère. Dans le cas d'une antenne réelle, la densité de puissance dépend aussi de la position angulaire. La directivité d'une antenne est définie par le rapport entre la densité de puissance rayonnée à une distance d (dans la direction du rayonnement maximal) sur la densité de puissance moyenne à la même distance d .

$$D = \frac{\text{densité de puissance dans la direction du maximum de puissance}}{\text{densité de puissance moyenne}} \quad (1.9)$$

Donc, une antenne isotropique a une directivité de $D=1$. Le gain peut être obtenu en incluant les pertes de l'antenne.

$$G = \eta \frac{\text{densité de puissance dans la direction du maximum de puissance}}{P_T / 4\pi d^2} \quad (1.10)$$

P_T est la puissance appliquée aux terminaux ;

$4\pi d^2$ est l'aire de la surface de la sphère de rayon d

η est l'efficacité totale de l'antenne, elle prend en compte de toutes les pertes de l'antenne ($\eta = \eta_T \eta_R$)

Le gain de l'antenne peut être décrit comme la différence entre la puissance de sortie dans une direction particulière et la puissance produite dans la même direction par une antenne isotropique.

L'ouverture rayonnante est une antenne qui utilise une ouverture à deux dimensions comme le corné et le réflecteur parabolique. Sa surface effective est définie par :

$$A_e = \eta A_p \text{ m}^2 \quad (1.11)$$

Où A_p est la surface physique de l'ouverture et η est l'efficacité de l'antenne (généralement de 50 % à 80 %). Le gain de l'ouverture a pour expression :

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (1.12)$$

Le diagramme de rayonnement est une description graphique de la variation du gain de l'antenne (exprimé en dB) en fonction des angles d'élévation et d'azimut. Il représente un diagramme à deux dimensions, l'angle azimutal et celle d'élévation. Le lobe principal d'une antenne est celui qui contient le point de maximum de gain. La largeur du lobe est l'angle relatif entre 2 intersections des lignes de 3dB et le lobe principal. L'antenne présente une impédance de charge quand un système quelconque sera placé à ses terminaux. Cette impédance inclue les pertes résistives dans l'antenne et quelques d'autres impédances complexes dues aux câbles et connecteurs à titre d'exemple. L'impédance d'entrée d'une antenne est un paramètre très important, grâce auquel l'adaptation aux circuits peut se faire, d'où l'antenne aura un maximum de puissance transmise (ou reçue). Sinon il y aura réflexion mesurée par le paramètre suivant :

$$|\rho| = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}} \quad (1.13)$$

Qui peut être aussi écrit comme suit :

$$|\rho| = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (1.14)$$

Z_1, Z_0 Sont les impédances du circuit et de l'antenne respectivement.

Le rayonnement de l'antenne est divisé en 3 régions. Les caractéristiques de l'onde rayonnée dans chacune des régions sont différentes.

La zone du champ lointain (Fraunhofer), elle est définie par les distances d telles que :

$$d > \frac{2D^2}{\lambda}$$

Où :

D est la dimension la plus grande d'une antenne ;

λ est la longueur d'onde.

Dans cette région l'onde devient approximativement plane et le gain de l'antenne devient dépendant uniquement des angles et ne varie pas en fonction de la distance.

La zone du champ proche rayonnante, cette région est aussi appelée zone de transmission.

$$\frac{\lambda}{2\pi} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$$

Le diagramme de rayonnement commence de prendre sa forme à partir de cette région, c'est la raison pour laquelle le gain dépend de la distance dans cette dernière. L'onde dans cette zone ne peut pas être approximée à une onde plane.

La zone du champ proche réactif est définie par : $r < \frac{\lambda}{2\pi}$

Cette zone est mesurée à partir du centre du rayonnement, elle est très proche de la surface de l'antenne. Les objets de cette zone seront couplés avec l'antenne et influencent le diagramme de rayonnement de la zone lointaine. Pour une antenne fonctionnant à 40GHz aucun objet ne peut causer l'effet de couplage tant que la zone du champ proche réactif est de l'ordre du millimètre. Par contre, il est très difficile d'éviter l'effet de couplage d'une antenne fonctionnant dans la zone HF qui a une région de champ réactif de l'ordre de 10m. L'illustration 1.2 montre les zones de rayonnement d'une antenne.

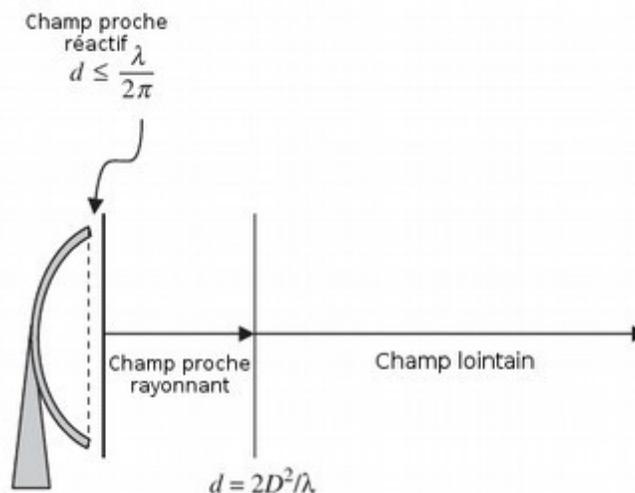


Illustration 1.2: Régions de rayonnement d'une antenne

La forme de l'antenne n'est limitée que par l'imagination. Tout conducteur peut être traité comme antenne. Mais, il importe de mentionner les types les plus utilisés.

1.3.1.1 Le dipôle demi-onde

Un dipôle demi-onde consiste de 2 segments de longueur $\frac{1}{4}\lambda$ avec une alimentation au milieu.

Le gain maximum théorique d'un dipôle demi-onde est de 2.14dB.

L'antenne quart d'onde (une antenne de longueur $\frac{1}{4}\lambda$) est généralement placée au dessus d'un

plan conducteur parfait (donc réflecteur parfait) ce qui permet au système d'apparaître comme une antenne demi-onde. La taille de l'antenne demi-onde peut être réduite en maintenant la taille électrique à $\frac{1}{2}\lambda$, ceci aura un effet négligeable sur le gain. Ce type d'antennes a une résistance de rayonnement d'environ 73Ω , pour une antenne demi-onde idéale alimentée du milieu, son impédance d'entrée est égale à la résistance de rayonnement. Le même dipôle peut être alimenté de l'extrémité ce qui augmente l'impédance d'entrée (elle devient d'environ 3000Ω), dans ce cas un circuit d'adaptation sera nécessaire à cause duquel l'efficacité de l'antenne peut être réduite.

1.3.1.2 L'antenne Yagi

Le dipôle demi-onde peut être un composant d'une structure plus complexe, l'antenne Yagi est un exemple d'antennes de ce type. Ce type d'antennes est composé d'un dipôle demi-onde situé au milieu, un réflecteur de taille un peu plus grande du dipôle d'un côté, et des éléments directeurs de tailles légèrement décroissantes de l'autre côté. L'antenne Yagi est une antenne directive qui génère une onde polarisée linéairement. La structure de l'antenne Yagi est montrée dans l'illustration 1.3 [2].

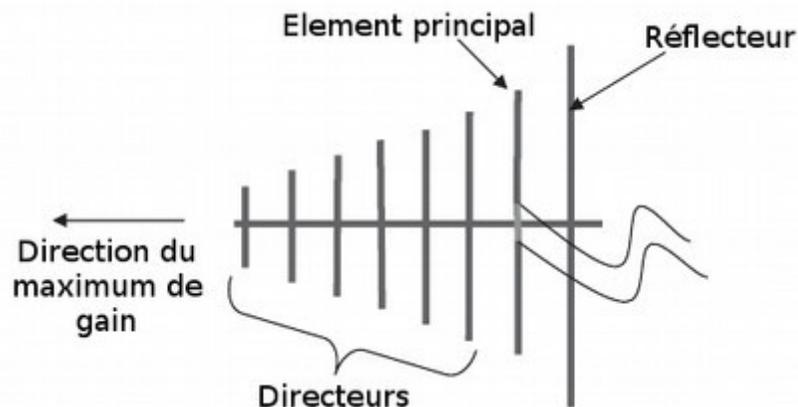


Illustration 1.3: La structure de l'antenne Yagi

1.3.1.3 L'antenne corné

L'antenne corné peut être traitée comme une extrémité ouverte d'un guide d'onde. La polarisation de l'onde dans le corné dépend de celle du guide d'onde. Il existe plusieurs formes d'antennes corné, le diagramme de rayon de ce type d'antennes dépend directement de l'ouverture. Un gain très élevé et un lobe principal étroit peuvent être atteints à l'aide de ces antennes suivant le but de la conception. Ce type d'antennes peut être utilisé comme standard de gains ou de calibration grâce à la prédictibilité de leurs gains.

1.3.1.4 Antennes à réflecteur

Les antennes à réflecteur incluent les réflecteurs paraboliques et l'antenne Cassegrain. Le

réflecteur parabolique a un émetteur/récepteur placé dans une petite unité située au point focal de la parabole. Au plus des pertes d'efficacité aux extrémités, les supports de l'alimentation de l'antenne produisent un blocage dans le champ rayonné ce qui cause des évanouissements et des diffractions dans le diagramme de rayonnement. L'alimentation peut être décalée du milieu afin de limiter les évanouissements rapides. L'antenne de diffusion TV est un exemple d'une antenne à réflecteur parabolique.

L'antenne Cassegrain est montrée dans la figure 1.4 [2]. Ce type d'antennes utilise un réflecteur parabolique mais son alimentation se situe au milieu de la parabole d'où le signal sera rayonné à un réflecteur secondaire fixé au point focal du réflecteur principal. Le réflecteur secondaire illumine donc le réflecteur principal duquel se produit le diagramme de rayonnement. L'avantage de ce type d'antenne est que l'unité d'émission/réception peut être placée sur l'antenne sans avoir besoins de câbles ou de guides d'onde, leur taille peut être illimitée, le contraire des réflecteurs paraboliques classiques. Ce type d'antennes est largement utilisé pour les communications sol-espace tant qu'il y a besoins d'une très grande sensibilité, cette antenne se dirige vers le ciel⁵. Le réflecteur secondaire avec son support cause des blocages et des diffractions.

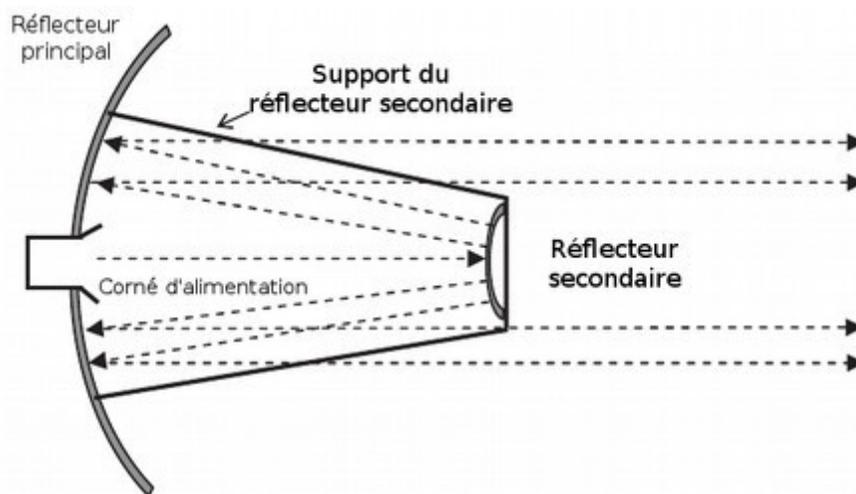


Illustration 1.4: Configuration de l'antenne Cassegrain

1.3.1.5 Réseaux d'antennes

Les réseaux d'antennes ont été initialement développées pour les larges bases terrestres de radars de poursuite, grâce auxquels le lobe principal peut être concentré sur chacune des cibles dans le domaine de vision du système rapidement, successivement et sans avoir besoins d'un repositionnement physique de l'ouverture. Ce réseau consiste en un ensemble d'éléments rayonnant de déphasage contrôlable. Le contrôleur de l'antenne ajuste la phase (et des fois le gain) pour chaque élément afin de produire un lobe principal dont la position et la largeur sont celles désirées tout en contrôlant les lobes

⁵ L'avantage des antennes qui se dirigent vers le ciel est l'absence des bruits dues au sol.

secondaires. Quelques systèmes peuvent même produire plusieurs lobes simultanément. Grâce à la puissance actuelle des systèmes électronique, ce type d'antennes est devenu largement utilisé dans les applications modernes telles que les antennes intelligentes dans les récepteurs GPS et les stations de base de la téléphonie cellulaire. Un autre avantage que présente cette configuration d'antennes est l'amélioration du fonctionnement des récepteurs en annulant les interférences venues d'une direction spécifique en utilisant des algorithmes adaptatifs[2].

1.3.1.6 Autres types d'antennes

Les antennes à lentille sont traitées comme des ouvertures rayonnantes avec une lentille qui couvre l'antenne et focalise le diagramme de rayonnement.

Les antennes Patch sont utilisées si une petite diminution dans l'efficacité passe indétectable par le système de transmission. Les antennes Patch sont largement utilisées dans les réseaux d'antennes, pour la téléphonie cellulaire et les applications du domaine aérien[2].

1.4 Systèmes de transmission FH

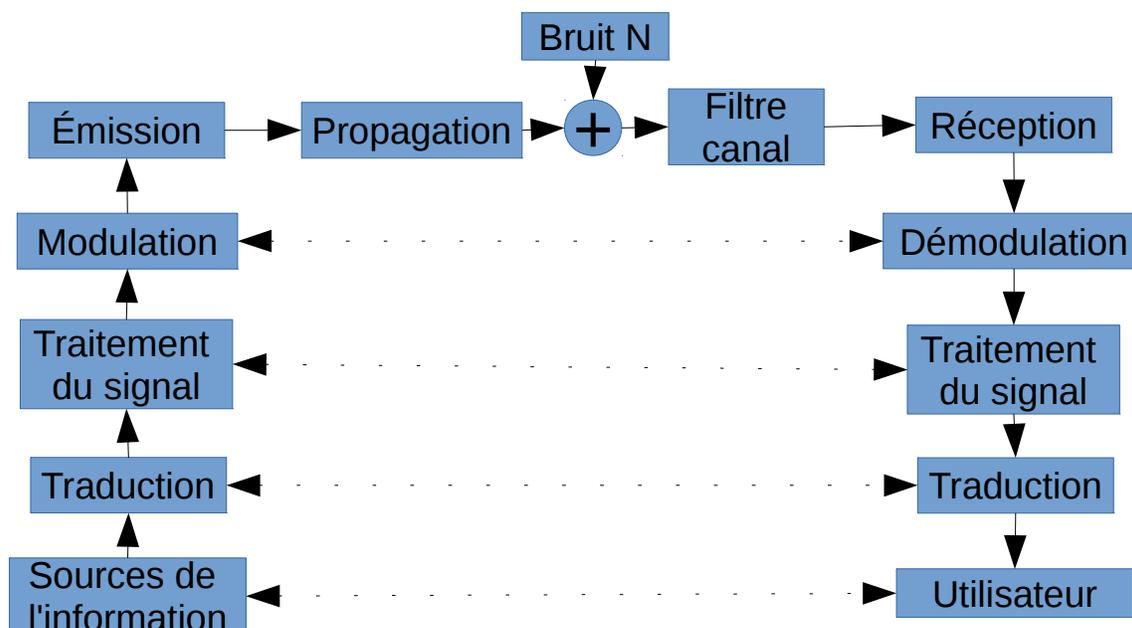


Illustration 1.5: Système de transmission FH

Lors de la conception d'un système de communication pour un environnement spécifique, il est intéressant de prédire, avec une certaine incertitude relative, les performances de la communication avant l'étape de fabrication. La planification RF pour certains réseaux comme les systèmes téléphoniques cellulaires ou bien les WLANs est un élément clé du déploiement des réseaux. Une

planification insuffisante peut causer des pertes de ressources ou des performances insatisfaisantes. Durant la planification d'un réseau, les paramètres contrôlant les performances de chaque lien individuel doivent être connues. Ces paramètres peuvent être l'intensité du signal reçu, les bruits qui l'accompagnent et d'autres problèmes liés au canal comme le multi-trajets et les interférences [3].

L'illustration 1.5 présente un simple système de transmission constitué de :

- Source de l'information, utilisateur : c'est la première source (ou le dernier utilisateur) de l'information sous la forme d'un signal compréhensible par l'être humain généralement (sons, températures, etc).
- Traduction : Ce bloque consiste en tout type de conversion du signal physique quelconque en un signal électrique et du signal électrique en un signal physique quelconque.
- Traitement du signal : c'est tout type de traitement du signal analogique ou, la plupart du temps, numérique comme l'amplification, codage, décodage, contrôle et correction d'erreurs, sécurité et cryptage, compression, décompression, etc.
- Modulation, démodulation : ce bloque représente tout type de modulation et démodulation, numérique ou analogique.
- Émission, réception : c'est l'interface entre l'onde guidée et l'onde qui se propage.
- Propagation : ce bloque représente les différents effets de transmission dans un milieu (réfraction, réflexion, atténuations, etc)
- Bruit N : il s'agit du bruit additif causé par l'environnement externe (bruit du sol, activités humaines, etc).
- Filtre canal : c'est une représentation de la sélectivité du canal, l'effet du dernier phénomène est identique à celui d'un filtre.

Le bilan de liaison sert à estimer le niveau du signal (ou signal sur bruit). Cette procédure permet aux concepteurs de prendre des décisions concernant les éléments utilisés, les gains par exemple, précise les antennes, la puissance transmise décide le type de l'équipement de transmission et des antennes utilisées ; ce qui influence le coût des différents systèmes et les conditions de la licence prévues. Un ingénieur de conception des systèmes doit être capable d'établir le bilan de liaison soigneusement. Ce dernier commence par la puissance d'émission, à laquelle les gains seront ajoutés et les pertes seront soustraites, pour aboutir à la puissance reçue. Afin d'avoir une idée sur les performances, une estimation sur le niveau de bruit s'avère nécessaire.

1.5 Caractéristiques du bilan de liaison

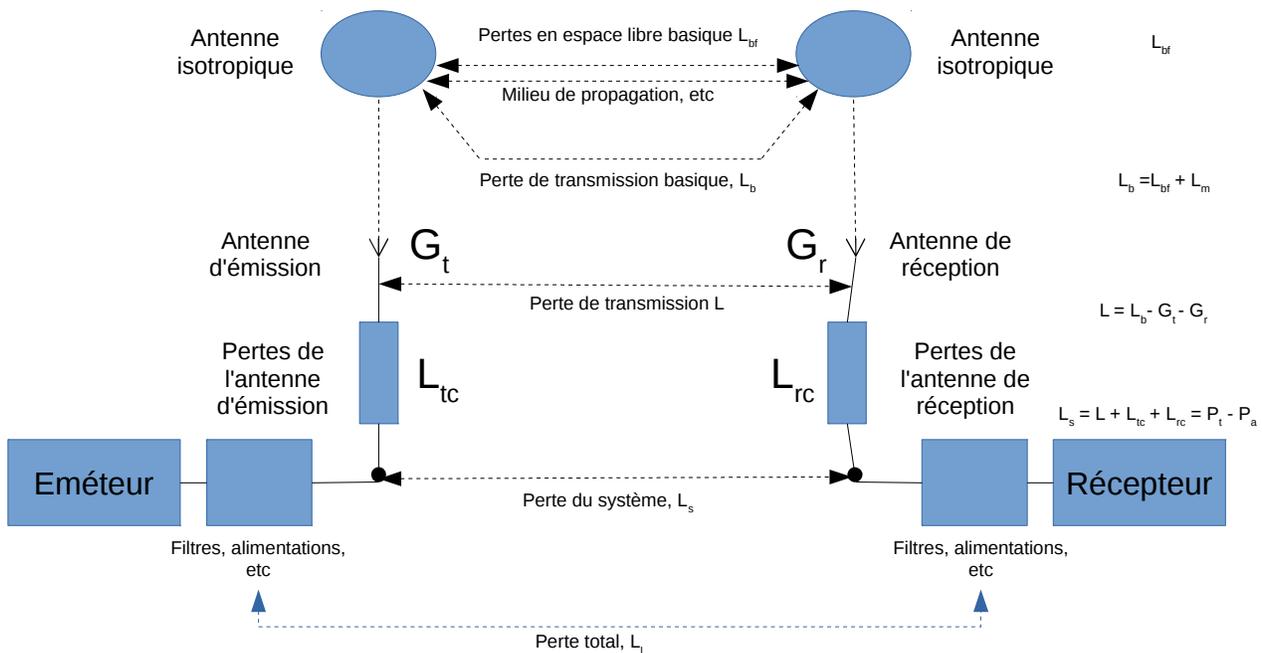


Illustration 1.6: Différents termes utilisés dans le bilan de liaison

En faisant l'abstraction du milieu de propagation, les caractéristiques de la liaison, montrées sur l'illustration 1.6 [4], seront définies comme :

1.5.1 Perte totale

L_t, A_t exprimée en décibels, le rapport entre la puissance transmise par l'émetteur de la liaison radio et la puissance au niveau du récepteur dans une installation, propagation et conditions réelles.

1.5.2 Perte du système

L_s, A_s le rapport, exprimé en décibels, pour une liaison radio, de la puissance du signal radio-fréquence à l'entrée des terminaux de l'antenne d'émission et la puissance du signal radio-fréquence disponible au niveau des terminaux de l'antenne de réception.

$$L_s = 10 \log(P_t / P_a) = P_t - P_a \text{ dB} \tag{1.15}$$

P_t puissance radio-fréquence à l'entrée des terminaux de l'antenne d'émission

P_a puissance du signal radio-fréquence disponible au niveau des terminaux de l'antenne de réception

1.5.3 Perte de transmission de la liaison radio

L_s, A Le rapport, exprimé en décibels, pour une liaison radio entre la puissance rayonnée par l'antenne d'émission et la puissance supposée disponible à la sortie de l'antenne de réception s'il n'y aura pas des pertes dans les circuits radio-fréquences et si le diagramme de rayonnement sera conservé.

$$L = L_s - L_{tc} - L_{rc} \quad (1.16)$$

L_{tc}, L_{rc} Pertes, en décibels, dans les circuits des antennes d'émission et de réception respectivement sans tenir en compte la dissipation associée au rayonnement des antennes.

$$L_{tc}, L_{rc} = 10 \log(r'/r) \quad (1.17)$$

r' paramètre résistif du circuit de l'antenne

r résistance du rayonnement

1.5.4 Perte de transmission basique

L_b, A_i Les pertes de transmission rencontrées si les antennes ont été remplacées par des antennes isotropiques de polarisation identique à celle des antennes réelles en gardant la distance mais sans tenir en compte des obstacles.

$$L_b = L + G_t + G_r \quad (1.18)$$

G_t, G_r gains directifs des antennes d'émission et de réception, respectivement, dans la direction de propagation.

1.5.5 Perte dans l'espace libre basique

L_{bf}, A_0 Les pertes de transmission qui apparaîtront si les antennes seront considérées isotropiques situées dans un diélectrique parfait, homogène dont l'environnement est illimité et isotropique en retenant la distance entre les antennes[5].

Si $d \gg \lambda$ alors :

$$L_{bf} = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \text{ dB} \quad (1.19)$$

1.5.6 Perte directe de chemin de transmission

L_t, A_t Les pertes de transmission d'un chemin de propagation direct sont les pertes de transmission

basiques moins les gain de l'antenne d'émission et de réception dans la même direction. Ce terme est réservé aux propagations à plusieurs chemins considérés séparément.

$$L_t = L_b - G_{tp} - G_{rp} \text{ dB} \quad (1.20)$$

G_{tp}, G_{rp} gains directifs de l'onde plane des antennes d'émission et de réception dans les directions de propagation et sous les polarisations considérées détaillées dans [4].

1.5.7 Perte relative à celle en espace libre

L_m, A_m La différence entre les pertes de transmission basiques et les pertes de transmission en espace libre basiques, exprimée en décibels.

$$L_m = L_b - L_{bf} \text{ dB} \quad (1.21)$$

L_m peut être divisée en des pertes de différentes formes :

- Absorption (ionosphérique, gaz atmosphériques et précipitation) ;
- Perte de diffraction comme les ondes superficielles ;
- Réflexion/réfraction comme le cas ionosphérique introduisant concentration et déconcentration ;
- Perte de couplage de polarisation ;
- Perte de couplage ouverture/milieu (dégradation de gain) ;
- interférence entre signal direct et signal reflété par le sol, autres obstacles ou les couches atmosphériques.

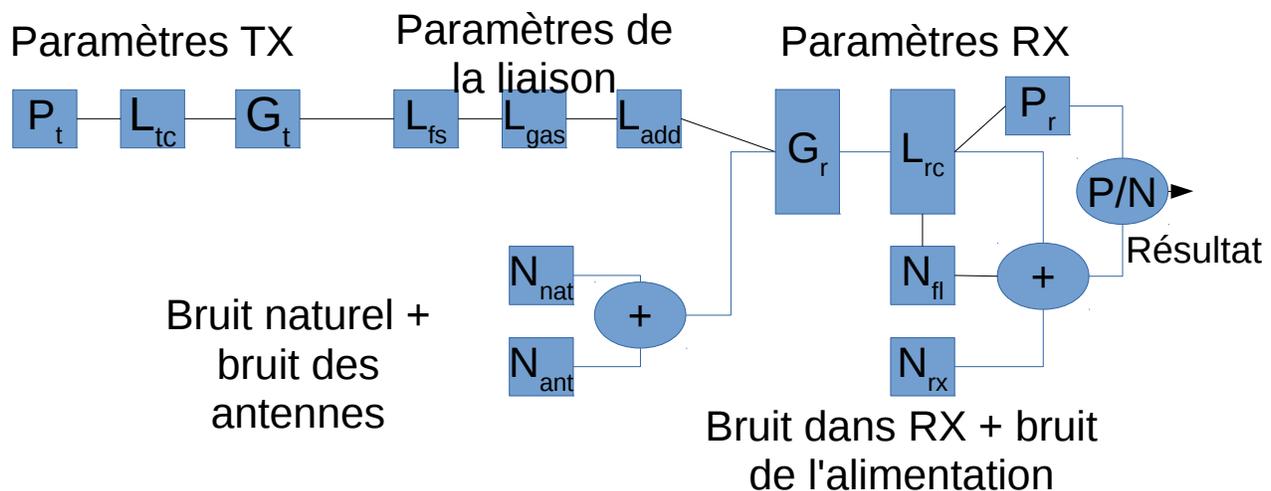


Illustration 1.7: Différents facteurs dans un bilan de liaison

Maintenant que les différentes caractéristiques sont définies de la même façon que [4] exige, un schéma en blocs, comme le propose [6], est montré dans l'illustration 1.7.

Il est important de noter que la partie du milieu (paramètres de la liaison) peut varier suivant les conditions météorologiques et environnementales à titre d'exemple. Ce manuscrit ignore les bruits dans le but de garder le nombre de paramètres d'entrée au minimum tant que le bruit dépend d'un nombre important de facteurs, ce qui rendra l'outil envisagé lourd à manipuler.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a donné un rappel sur l'électromagnétisme, la propagation RF, les antennes et le système de transmission FH ainsi que les différentes caractéristiques du bilan de liaison.

Dans le second chapitre, nous allons aborder les modèles de propagation RF qui peuvent être utilisés dans le calcul du bilan de liaison.

Chapitre 2: Modèles de propagation RF

2.1 Introduction

Ce chapitre traite le bilan de liaison en introduisant des modèles de paramètres qui ont une influence directe et relativement importante sur la puissance et la qualité du signal le long du chemin traversé depuis l'émission jusqu'à la réception.

Plus de facteurs sont pris en compte dans le calcul du bilan plus la précision sera améliorée. Certains facteurs sont occasionnels, d'autres existent dans la totalité des cas. Le brouillard, la végétation et la pluie sont des exemples de la 1^{ère} catégorie, l'atténuation due aux gaz est un exemple de la 2^{ème} [7], [8]. Quelques modèles recommandés par l'ITU-R seront traités par la suite.

2.2 Modélisation de l'atmosphère

En se concentrant toujours sur le but du manuscrit, modéliser l'atmosphère s'avère une tâche nécessaire ; ceci aura deux effets :

- Simplifier au maximum l'utilisation de l'outil envisagé.
- Utiliser des moyennes annuelles et géographiques au lieu de raisonner sur des cas particuliers.

Du point de vue électromagnétique, l'atmosphère est une infinité de couches, tout en gardant une grande précision, ce dernier peut être représenté par des couches distraites dont la largeur varie de 10cm au niveau de la couche la plus basse (le sol) jusqu'à 1km sur une altitude de 100km.

Chaque couche sera caractérisée par un indice de réfraction qui va dépendre de la température, la pression et la densité de vapeur d'eau. Ces dernières vont dépendre de l'altitude, la latitude et la saison ; ce qui est bien détaillé dans [9] et [10].

2.2.1 La référence d'atmosphères standards

En choisissant le modèle qui divise le globe terrestre en 3 régions en fonction de la latitude et l'année en 2 saisons, il y aura des résultats relativement précis (comparés aux moyennes), un traitement détaillé des différents cas, comme le recommande [10] est donné dans l'annexe A.

2.2.2 L'indice de réfraction

L'indice de réfraction peut être donné par :

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (2.1)$$

N la réfractivité radio, donnée par :

$$N = N_{sec} + N_{humide} = \frac{77.6}{T} (P + 4810 \frac{e}{T}) \text{ Unités de N} \quad (2.2)$$

Le terme sec, N_{sec} , de la réfractivité radio est donné par :

$$N_{sec} = 77.6 \frac{P}{T} \quad (2.3)$$

Et le terme humide, N_{humide} , par :

$$N_{humide} = 3.732 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2.4)$$

Où :

P pression atmosphérique (hPa) ;

e pression de la vapeur d'eau (hPa) ;

T température absolue (K).

Cette formule est utilisée pour toutes les fréquences, pour des fréquences supérieures à 100GHz l'erreur est inférieure à 0.5 %. La pression de vapeur d'eau peut être obtenue de l'annexe B.

2.3 Propagation dans les milieux internes

La prédiction de propagation pour les systèmes radio internes diffère, en quelques sortes, de celle pour les systèmes externes de façon que la couverture dans le 1^{er} type est bien définie par la géométrie et les limites du bâtiment, ces dernières vont influencer la propagation. La réutilisation des fréquences est envisagée au niveau du même étage et entre étages dans le même bâtiment ce qui va ajouter une 3^{ème} dimension aux problèmes d'interférences. La petite surface où les fréquences millimétriques sont utilisées cause des effets énormes sur les caractéristiques de la propagation pour des petits changements dans l'environnement. À cause de la nature complexe de ces facteurs, si la planification doit être exacte, des connaissances détaillées sur un milieu particulier doivent se présenter, la géométrie, les matériaux, la fourniture et le comportement prévu des usagers étant des exemples. Cependant, pour une planification initiale il est nécessaire d'estimer le nombre de stations de base pour assurer la couverture à un ensemble de stations mobiles à l'intérieur de la zone afin d'estimer les interférences avec d'autres services ou entre systèmes. Pour ces cas de planification de systèmes, des modèles représentant des caractéristiques de propagation dans l'environnement doivent se présenter. En même temps, le nombre des paramètres d'entrée du modèle doit rester au minimum pour garantir la simplicité d'utilisation [11].

2.3.1 Particularités et mesures de qualité

Les problèmes de propagation sur le canal radio, des milieux internes sont généralement causés par :

- Réflexions et diffractions à cause des objets (les murs et les plafonds étant inclus) au niveau des chambres ;
- Perte de transmission à travers les murs, les plafonds et les autres types d'obstacles ;
- Canalisation de l'énergie dans les hautes fréquences ;
- Mouvement des objets et personnes dans la chambre en incluant l'un ou les deux terminaux de la liaison.

Ces problèmes, généralement, sont :

- Perte de parcours, introduisant non seulement les pertes en espace libre, mais aussi des pertes additives dues aux obstacles et à la transmission à travers les matériaux du bâtiment.
- Variation spatiale et temporaire dans l'intensité des pertes.
- Les effets de multi-trajet des composantes réfléchies et réfractées de l'onde.
- Différence de polarisation entre émission et réception due à l'alignement aléatoire du terminal mobile.

La caractérisation des communications internes sans fil peut être faite en se basant sur :

- Haut/moyen/faible débit des données ;
- Zone de couverture de chaque station de base (chambre, étage, bâtiment) ;
- Mobile/portable/fixé ;
- Temps réel/ temps non réel/ temps quasi-réel ;
- Topologie du réseau (point à point, point à multipoint, maillée).

Il est utile de définir les caractéristiques de propagation d'un canal les plus appropriées pour décrire sa qualité pour différentes applications comme les communications par voix, le transfert des données à différentes vitesses, les services de transfert d'images et de vidéos. La table 2.1 donne les caractéristiques les plus importantes pour des services typiques.

2.3.2 Modèle de perte de parcours

L'utilisation de ce modèle de perte de transmission exige que la station de base et le terminal portable doivent se situer à l'intérieur du même bâtiment. Les pertes de parcours internes sont caractérisées par une moyenne de pertes et les statistiques de l'environnement associées. Plusieurs modèles de perte internes prennent en compte les pertes à travers les murs et/ou plusieurs étages. Le

modèle décrit dans cette section prend en compte les pertes à travers plusieurs étages afin de permettre l'utilisation de quelques caractéristiques comme la réutilisation des fréquences entre étages. Les coefficients donnés ci-dessous des pertes de puissance le long d'une distance permettent, implicitement, la transmission à travers les murs et les obstacles et d'autres mécanismes trouvés probablement au niveau d'un seul étage d'un même bâtiment. Des modèles plus spécifiques peuvent avoir l'option de prendre en compte explicitement des pertes dues à chaque mur au lieu de les garder implicites dans le modèle de distance.

Le modèle basique a la forme suivante :

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \text{ dB} \quad (2.5)$$

Où :

N coefficient de puissance de distance ;

f fréquence (MHz) ;

d distance de séparation (m) entre la station de base et le terminal portable avec $d > 1 \text{ m}$;

L_f facteur de perte de pénétration ;

n nombre de plafonds entre la station de base et le terminal portable $n \geq 1$.

Services	Caractéristiques	Problèmes de propagation concernés
WLAN	Haut débit, une ou plusieurs chambres, portable, temps non réel, point à multipoint ou structure maillée	Perte de parcours – distribution temporaire et spatiale Retard multi – trajet Interférence radio
WPBX	Débit moyen, plusieurs chambres, un étage ou plusieurs étages, temps réel, mobile, point à multipoint	Perte du parcours – distribution spatiale et temporaire
Diffusion indoor	Débit réduit, plusieurs étages, temps non-réel, mobile, point à multipoint	Perte du parcours – distribution spatiale et temporaire
Vidéo sans-fil indoor	Débit des données élevé, plusieurs chambres, temps réel, mobile ou portable, point à point	Perte du parcours – distribution spatiale et temporaire Retard multi-trajet

Table 2.1: Services typiques et problèmes associés

Des paramètres typiques basés sur plusieurs résultats sont donnés dans l'annexe C [11].

2.3.3 Des modèles spécifiques

Pour estimer les pertes de parcours ou bien l'intensité du champ, les modèles spécifiques peuvent être aussi utiles. Des modèles pour des applications internes de prédiction de l'intensité de champs basée sur la théorie uniforme de diffraction (UTD) et les techniques de traçage de rayonnement sont aussi disponibles. L'inconvénient est la nécessité d'informations détaillées sur la structure pour les calculs de l'intensité du champ dans les milieux internes. Ces modèles combinent des éléments empiriques et les approches électromagnétiques théoriques de l'UTD. La méthode prend en compte les rayonnements directs, à une seule réflexion et à une seule diffraction, Cette méthode peut être généralisée à plusieurs réflexions et plusieurs réfractions et à des combinaisons de rayonnement diffractés et réfléchies, la précision des pertes sera améliorée.

2.4 Atténuation due aux gaz

Pour des applications générales, les procédures qui suivent doivent être utilisées pour le calcul de l'atténuation due aux gaz à des fréquences qui peuvent atteindre 1000 GHz [12].

2.4.1 L'atténuation spécifique

L'atténuation spécifique à des fréquences allant de 0 à 1000 GHz due à l'air sec et à la vapeur d'eau peut être évaluée, avec une bonne précision, en toute valeur de pression, température et humidité par la sommation des lignes individuelles de résonance de l'oxygène et la vapeur d'eau ensemble avec d'autres facteurs additives du spectre de Debye de l'oxygène pour des fréquences inférieures à 10 GHz, l'atténuation due au nitrogène par pression induite pour des fréquences supérieures à 100 GHz et une partie continue humide pour prendre en compte l'excès de l'absorption de la vapeur d'eau trouvée expérimentalement. Ces lignes sont montrées dans les courbes des illustrations 2.1 et 2.2.

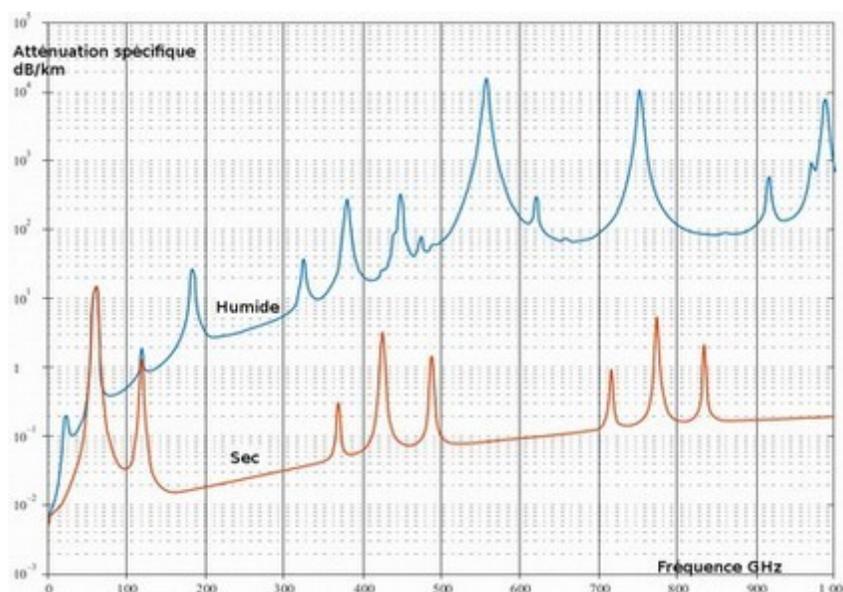


Illustration 2.1: Atténuation spécifique due aux gaz atmosphériques

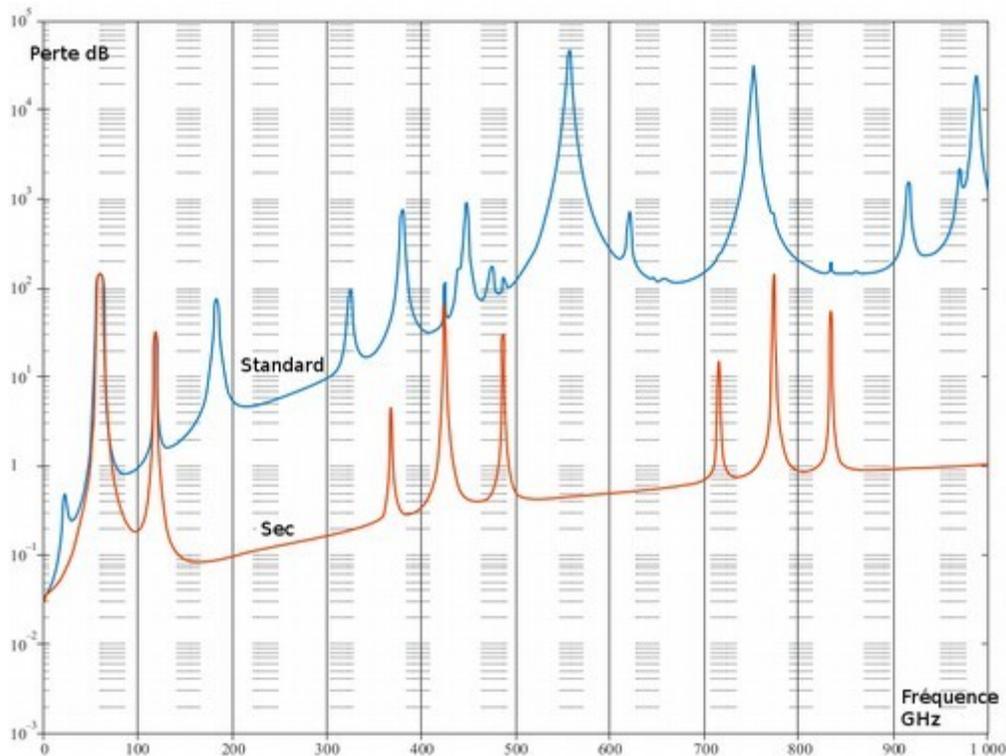


Illustration 2.2: Atténuation maximale due aux gaz atmosphériques

À environ 60 GHz plusieurs lignes d'absorption d'oxygène s'additionnent, à des pressions du niveau de la mer pour former une vaste bande d'absorption comme le montre les courbes des illustrations 2.1 et 2.2.

Ces courbes, avec celles de l'illustration 2.3, montrent aussi l'atténuation due à l'oxygène à des hautes altitudes avec des lignes individuelles plus claires à des basses pressions.

L'atténuation spécifique due aux gaz est donnée par :

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f \tilde{N}(f) \text{ dB/km} \quad (2.6)$$

Avec γ_o, γ_w représentent les atténuations spécifiques (dB/km) dues à l'air sec⁶ et la vapeur d'eau respectivement, f est la fréquence en GHz, et $\tilde{N}(f)$ est la partie imaginaire de la partie dépendante de la fréquence de la réfractivité complexe [12]. Cette dernière est détaillée dans l'annexe D.

6 Cette atténuation est due essentiellement à l'oxygène, la pression induite du nitrogène et l'atténuation de Debye non-résonante.

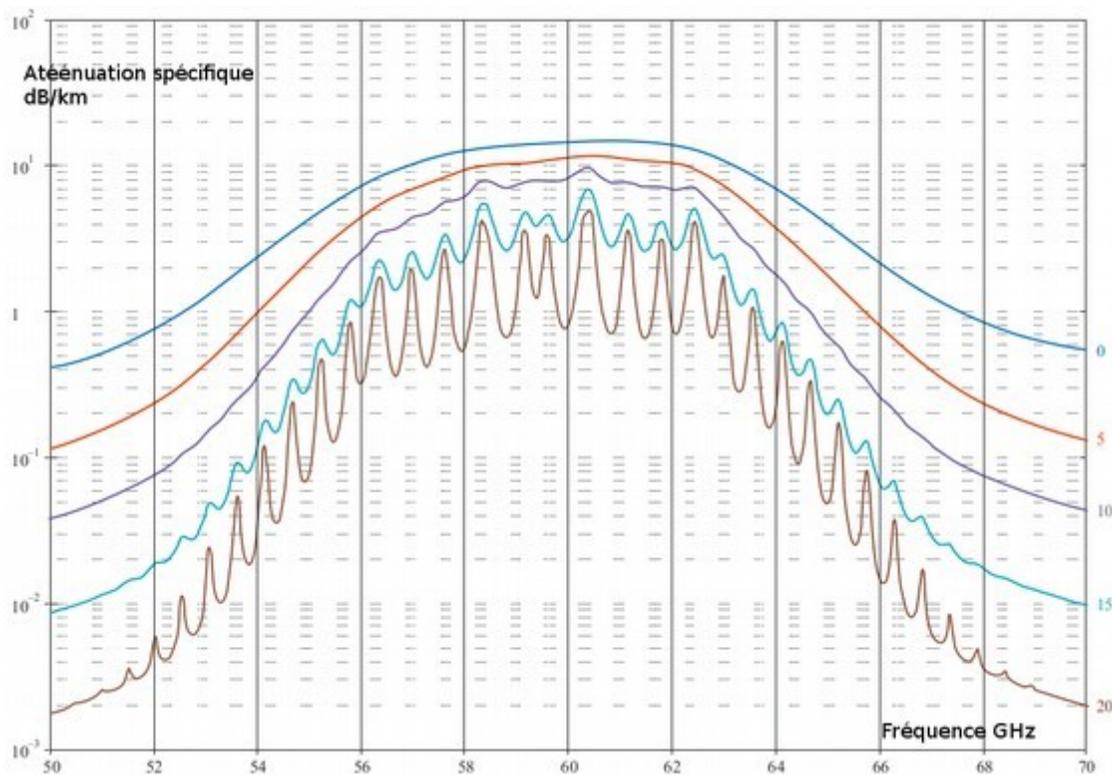


Illustration 2.3: Atténuation spécifique aux altitudes indiquées

2.4.2 Atténuation du parcours

2.4.2.1 Chemin terrestre

Pour un chemin terrestre ou faiblement incliné proche du sol, l'atténuation du parcours A peut être donnée par :[12]

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \text{ dB} \quad (2.7)$$

Avec r_0 est la longueur du chemin (km).

2.4.2.2 Chemin incliné

Cette section donne une méthode pour intégrer l'atténuation spécifique calculée en utilisant le modèle décrit précédemment, à différentes pressions, températures et humidités à travers l'atmosphère.

Dans ce sens, l'atténuation du parcours des systèmes de communication dans toute configuration géométrique à l'intérieur et l'extérieure de l'atmosphère peut être déterminé, avec une grande précision, en divisant l'atmosphère en des couches horizontales spécifiant le profil des

paramètres météorologiques de pression, température et humidité le long du chemin.

S'il y a absence d'un profil local, les données d'une sonde radio par exemple, la référence d'atmosphère standard peut être utilisée [12].

L'atténuation du parcours totale d'un chemin incliné $A(h, \varphi)$ d'une station d'une altitude h et une angle d'élévation φ peut être calculée pour $\varphi \geq 0$ comme : [12]

$$A(h, \varphi) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH \quad (2.8)$$

Φ peut être déterminée en se basant sur la loi de Snell en système de coordonnées polaires comme :

$$\Phi = \arccos\left(\frac{c}{(r+H) \times (nH)}\right) \quad (2.9)$$

où : $c = (r+h) \times n(h) \times \cos \varphi$

où : $n(h)$ est l'indice de réfraction radio atmosphériques calculé à partir de la pression, la température et la pression de vapeur d'eau le long du chemin précisé dans la section 2.2.

Pour $\varphi < 0$ il existe une hauteur minimale, h_{min} , à laquelle le lobe radio devient parallèle à la surface de la terre.

La valeur de h_{min} peut être déterminée de l'équation récurrente suivante :

$$(r+h_{min}) \times n(h_{min}) = c \quad (2.10)$$

La dernière équation peut être résolue récursivement en prenant $h = h_{min}$ comme valeur initiale.

$$\dot{h}_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - r \quad (2.11)$$

Par conséquent $A(h, \varphi)$ peut être calculée comme suit :

$$A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \varphi} dH + \int_{h_{min}}^h \frac{\gamma(H)}{\sin \varphi} dH \quad (2.12)$$

Pendant le calcul de l'intégrale des équations 2.8 et 2.12 il peut y avoir une infinité à $\varphi = 0$. Cependant cette singularité peut être éliminée par un changement de variable approprié, en utilisant

$u^4 = H - h$ dans l'équation 2.8 et $u^4 = H - h_{min}$ dans l'équation 2.12 [12].

Une solution numérique de l'atténuation due aux gaz atmosphériques peut être implémentée en utilisant l'algorithme suivant.

Afin de calculer l'atténuation totale d'une liaison satellitaire il est nécessaire de savoir non uniquement l'atténuation spécifique en tout point de la liaison mais aussi la longueur de la liaison qu'elle a cette atténuation. Pour dériver la longueur du chemin, il est aussi nécessaire de considérer la courbure du rayonnement qui se crée dans une terre sphérique.

En utilisant l'illustration 2.4 comme référence a_n est la longueur du chemin à travers la couche n d'une épaisseur δ_n , un indice de réfraction n_n .

α_n et β_n sont les angles d'incidence et de sortie. Les r_n sont les rayons, prises du centre de la terre jusqu'au début de la couche n . a_n peut donc être exprimé comme suit :

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8r_n \delta_n + 4\delta_n^2} \quad (2.13)$$

L'angle α_n peut être calculé de [12] :

$$\alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2r_n \delta_n - \delta_n^2}{2a_n r_n + 2a_n \delta_n} \right) \quad (2.14)$$

β_1 est l'angle d'incidence au niveau de la station au sol (le complément de l'angle d'élévation φ). β_{n+1} peut être calculé à partir de α_n en utilisant la loi de Snell qui devient dans ce cas :

$$\beta_{n+1} = \arcsin \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right) \quad (2.15)$$

Avec n_n et n_{n+1} sont les indices de réfraction des couches n et $n+1$.

L'équation peut devenir invalide à de très faibles angles d'élévation ($\varphi < 1$).

L'atténuation totale peut donc être dérivée comme :

$$A_{gas} = \sum_{n=1}^K a_n \gamma_n \text{ dB} \quad (2.16)$$

γ_n l'atténuation spécifique dérivée de l'équation 2.6.

Pour assurer une estimation exacte de l'atténuation du parcours, l'épaisseur des couches doit augmenter exponentiellement de 10cm au niveau de la couche la plus basse (sol) jusqu'à 1km à une altitude de 100km suivant l'équation suivante :

$$\delta_i = 0.0001 \exp\left(\frac{i-1}{100}\right) \text{ km} \quad (2.17)$$

avec i allant de $i=1$ jusqu'à 922, en notant que $\delta_{922} \approx 1.0 \text{ km}$ et $\sum_{i=1}^{922} \delta_i \approx 100 \text{ km}$.

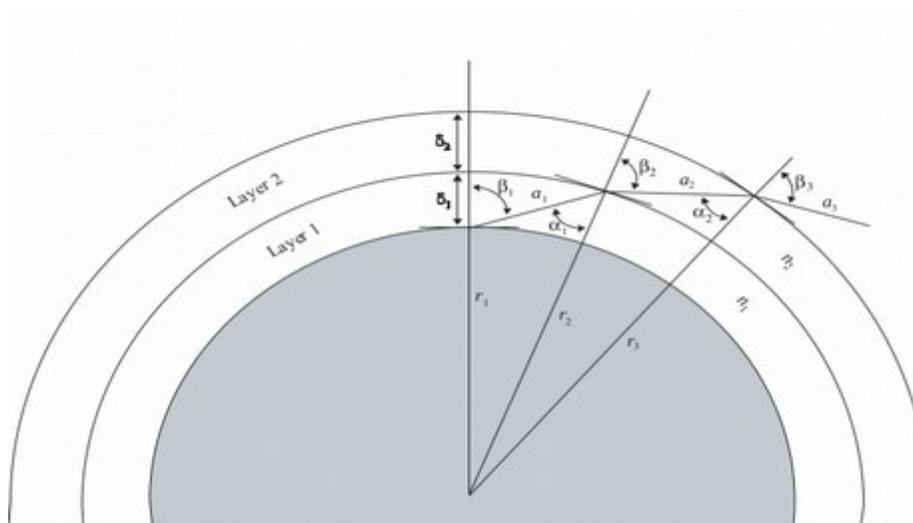


Illustration 2.4: La référence utilisée pour les couches

Pour les applications sol-espace l'intégration doit se faire, au moins, jusqu'à 30km et jusqu'à 100km aux fréquences des lignes de centre de l'oxygène [12].

L'illustration 2.4 a été utilisée comme référence des couches, angles et différentes distances.

2.5 Atténuation dans la végétation

L'atténuation dans la végétation peut être importante dans certains circonstances pour les systèmes sol-sol et sol-espace. Cependant, les conditions et types de végétation rendent difficile le développement d'une procédure de prédiction généralisée, il y a aussi un manque de données expérimentales [13].

Dans l'illustration 2.5, l'émetteur est à l'extérieur de la forêt et le récepteur est à une certaine distance d dans cette dernière. L'atténuation en excès est donnée par :

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp(-d \gamma / A_m)] \quad (2.18)$$

d longueur du chemin dans la forêt (m)

γ l'atténuation spécifique pour un chemin élémentaire (dB/m)

A_m l'atténuation maximale pour un terminal situé à l'intérieur d'un type et une distance spécifique d'une végétation (dB).

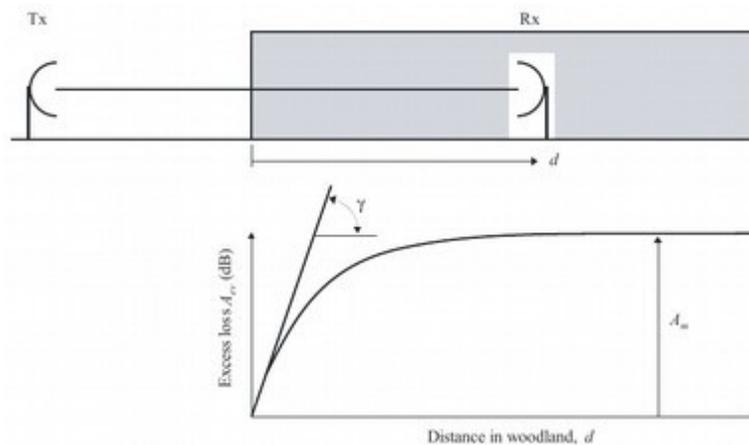


Illustration 2.5: Distance à travers la forêt

Il est important de noter que l'atténuation en excès, A_{ev} , est définie comme un élément en excès à des autres mécanismes, non pas seulement les pertes en espace libre. L'atténuation spécifique γ (dB/m) dépend de la densité de végétation.

Des mesures à des fréquences allant de 105 jusqu'à 2200 MHz prises à des forêts mixtes devant St. Petersburg (Russie) à des parcours qui varient dans la longueur de quelques centaines de mètres jusqu'à 7km ayant différents types d'arbres et une hauteur moyenne de 16m vérifient l'équation avec des constantes d'atténuations spécifiques et maximales données dans la table 2.2.

Paramètre	Fréquence (MHz) et polarisation				
Fréquence, MHz	105.9	466.475	949	1852.2	2117.5
	Horizontal	incliné	incliné	incliné	incliné
γ (dB/m)	0.04	0.12	0.17	0.3	0.34
A_m (dB)	9.4	18	26.5	29	34.1

Table 2.2: Exemples de paramètres mesurés devant St. Petersburg

La dépendance en fréquence de A_m (dB) est de la forme :

$$A_m = A_e f^\alpha \quad (2.19)$$

Avec f étant la fréquence.

2.5.1 Chemin incliné

Pour décrire les pertes d'atténuation L le long des chemins horizontaux et inclinés, le modèle suivant est proposé :[13]

$$L(\text{dB}) = A f^B d^C (\theta + E)^G \quad (2.20)$$

Où :

f fréquence (MHz)

d distance à travers la végétation (m)

θ élévation (degrés)

A, B, C, E, G des paramètres expérimentaux

Exemple de forêt de pins en Autriche

$$L(\text{dB}) = 0.25 f^{0.39} d^{0.25} E^{0.05} \quad (2.21)$$

2.6 Modèle d'atténuation pour la pluie

L'atténuation spécifique γ_R (dB/km) est obtenue du rapport de flux de pluie en utilisant une relation de loi en puissance [14].

$$\gamma_R = K R^\alpha \quad (2.22)$$

Les valeurs de coefficients K et α sont déterminées comme fonctions de la fréquence f (GHz) dans l'intervalle de 1 à 1000GHz des équations suivantes[14].

$$\log_{10} K = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_K \log_{10} f + c_K \quad (2.23)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (2.24)$$

Où :

f fréquence (GHz) ;

K est K_H ou K_V ;

α est α_H ou α_V .

Les valeurs des coefficients K_H de polarisation horizontale sont données dans la table 2.3 et les coefficients K_V de polarisation verticale dans la table 2.4. la table 2.5 donne les valeurs des coefficients α_H pour une polarisation horizontale et la table 2.6 donne les valeurs des coefficients α_V pour une polarisation verticale [14].

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098		
2	-0.35351	1.2697	0.454		
3	-0.23789	0.86036	0.15354	-0.18961	0.71147
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

Table 2.3: Coefficients pour K_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061		
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899	-0.16398	0.63297
4	0.50167	1.07319	0.27195		

Table 2.4: Coefficients pour K_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187		
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164	0.67849	-1.95537
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.4399		

Table 2.5: Coefficients pour α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.3384	-0.76284		
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.1452	0.26809	-0.053739	0.83433
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Table 2.6: Coefficients pour α_H

Pour des polarisations linéaires et circulaires, quelque soit la géométrie du chemin les coefficients de l'équation 2.22 peuvent être calculés à partir des valeurs données par celles 2.23 et 2.24 en utilisant les équations suivantes :

$$K = [K_H + K_V - (K_H - K_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \quad (2.25)$$

$$\alpha = [K_H \alpha_H - K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2K \quad (2.26)$$

Où :

θ angle d'élévation du chemin ;

τ angle de polarisation par rapport à l'horizontale ($\tau = 45^\circ$ pour une polarisation circulaire).

2.7 Atténuation due aux brouillards

Pour des nuages et brouillards composés de petites gouttelettes, généralement inférieures à 0.01cm, l'approximation de Rayleigh est valide pour des fréquences inférieures à 200GHz, il est possible d'exprimer l'atténuation en termes de l'eau totale contenue dans une unité de volume. L'atténuation spécifique, donc, à l'intérieur des nuages ou brouillards peut être écrite comme [15] :

$$\gamma_c = K_l M \text{ dB/km} \quad (2.27)$$

Où :

γ_c l'atténuation spécifique (dB/km) ;

K_l coefficient de l'atténuation spécifique ((dB/km)/(g/m³)) ;

M densité de l'eau liquide (g/m³).

À des fréquences supérieures de 100GHz, l'atténuation due aux brouillards peut devenir importante.

La densité de l'eau liquide est typiquement d'environ 0.05 g/m³ pour une visibilité de l'ordre de

300m et 0.5 g/m^3 pour une visibilité de 50m.

2.7.1 Coefficient de l'atténuation spécifique

Un modèle mathématique basé sur la diffraction de Rayleigh qui utilise le modèle de Debye-double pour une permittivité diélectrique $\epsilon(f)$ de l'eau peut être utilisée pour calculer la valeur de K_l pour des fréquences allant jusqu'à 1000GHz.

$$K_l = \frac{0.819f}{\tilde{\epsilon}(1+\eta^2)} \text{ (dB/km)/(g/m}^3\text{)} \quad (2.28)$$

Avec f étant la fréquence (GHz) et :

$$\eta = \frac{2+\dot{\epsilon}}{\tilde{\epsilon}} \quad (2.29)$$

La permittivité diélectrique complexe est donnée par : [15]

$$\tilde{\epsilon}(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p[1+(f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s[1+(f/f_s)^2]} \quad (2.30)$$

$$\dot{\epsilon}(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1+(f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1+(f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (2.31)$$

$$\epsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1) \quad (2.32)$$

$$\epsilon_1 = 0.0671 \epsilon_0 \quad (2.33)$$

$$\epsilon_2 = 3.52 \quad (2.34)$$

$$\theta = 300/T \quad (2.35)$$

Où :

T la température (K)

Les fréquences de relaxation principale et secondaire sont :

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \text{ GHz} \quad (2.36)$$

$$f_s = 39.8 f_p \text{ GHz} \quad (2.37)$$

2.8 Conclusion

Différents paramètres ont été traités, mais il existe d'autres types d'atténuations ; l'évanouissement rapide, les effets de multi-trajets et les obstacles au niveau des zones de Fresnel [16] étant des exemples des phénomènes qui ne seront pas traités tant qu'il y a nécessité des informations détaillées sur le sol tout au long du chemin.

Chapitre 3: L'application linkb

3.1 Introduction

Le chapitre précédant a donné une description sur tous les modèles qui sont nécessaires pour la création de l'outil. Ce Chapitre a pour but de rassembler les pièces en un seul outil de calcul, et présente dans sa majorité des hiérarchies représentant le cœur de l'application, en plus des captures d'écran sur le fonctionnement et l'apparence de cette dernière.

3.2 Le choix du langage et de la plate-forme

Après avoir préparé les modèles et décidé les caractéristiques de l'outil, il est nécessaire de cibler une plate-forme et de faire le choix du langage, de l'environnement et des bibliothèques qui seront utilisées. La décision sera prise sous les contraintes suivantes :

- Le langage doit être un langage évolué, d'une syntaxe simple et une bonne abstraction ;
- Des outils disponibles librement avec leurs bibliothèques et loin des programmes propriétaires ;
- Cibler le maximum de plateformes.

Trois combinaison semblent capables de répondre à ces contraintes :

- C++ sous Qt Community ;
- Java avec la bibliothèque Swing ;
- Python avec Kivy.

Au début la décision était la première combinaison mais à cause des difficultés rencontrées lors de la création d'un Android Package due à des problèmes reliés aux micro-processeurs de chaque appareil, il fallait penser à utiliser Java afin de résoudre ces problèmes. Les modèles ont été, donc, réalisés sous Java ; cependant, la complexité de l'interface graphique sous Swing n'était pas vraiment proportionnelle à la complexité de l'application.

La combinaison Python avec Kivy semble idéale pour ce cas et peut répondre à la majorité des critères. L'environnement de travail est le Debian Jessie, l'équipe de cette distribution de GNU/Linux a fait un très grand travail en réalisant un Package prêt à être utilisé pour Kivy nommé « python-kivy », et comme la majorité des autres distributions GNU/Linux Python 2.7.x et Python 3.x sont installés par défaut. Par conséquent l'environnement de développement de l'application peut être créé par la simple commande « aptitude update && aptitude install python-kivy ». Gedit dans Gnome et Kate dans kde-plasma sont des éditeurs de textes parfaits installés par défauts dans les DE cités, ces derniers sont utilisés dans le projet.

Kivy est une librairie software open source destinée pour le développement rapide des applications équipées des interfaces utilisateur modernes comme les applications multi-touch. Ce type d'applications est le plus recommandé tant qu'il est moderne et en croissance continu. Kivy a été créé du zéro spécialement pour ce type d'interactions. Cette librairie a été optimisée par plusieurs méthodes pour qu'elle soit rapide lors du développement des applications et lors de leur exécution. Les taches critiques ont été réalisées dans le niveau C afin de profiter de la puissance des compilateurs qui existent en plus de l'utilisation des algorithmes intelligents afin d'optimiser les opérations coûteuses ; au besoin le GPU peut être utilisé. Les applications créées en utilisant cette librairie peuvent être portées à plusieurs dispositifs comme ceux basés sur Android grâce à sa flexibilité. Kivy supporte la majorité des systèmes d'exploitation (GNU/Linux, OS X, Windows) tant qu'il est basé sur Python ce qui accélère la production. Il existe aussi un langage Kivy (.kv) qui peut être très intéressant pour l'arrangement rapide des éléments de l'application. Il s'agit d'un projet développé par des professionnelles de type community. L'illustration 3.1 présente le logo de kivy [17].



Illustration 3.1: Le logo de Kivy

Python est un langage de programmation simple à utiliser qui offre une structure en plus d'un support pour les larges programmes. Ce langage est connu par des bonnes librairies de vérification d'erreurs (Error Checking). Python est vaste et offre des types de données intégrés de haut niveau comme les tableaux et les dictionnaires, c'est un langage de très haut niveau. Ses types de données sont généralisés de façon à permettre l'utilisation du langage à un domaine large de problèmes. Python permet de diviser le programme en des modules qui peuvent être utilisés dans d'autres programmes et projets. Ce langage contient une grande collection de modules qui peut être utilisé au besoins ou comme des exemples lors de l'apprentissage de la programmation en Python. Ces modules fournissent des opérations comme les « file I/O », « System calls », les sockets, des interfaces pour la programmation GUI comme Tk, etc. Python est un langage interprété donc il n'y a pas nécessité des processus de « compilation » et « linking ». L'interpréteur peut être utilisé interactivement pour les tests, les tâches simples comme un calculateur de bureau ou durant un développement du type Bottom-

Up. Python est extensible, il est possible d'intégrer des fonctions dans le but d'accomplir les opérations critiques par exemple, comme il est possible de relier Python à des bibliothèques disponibles en format binaire. L'illustration 3.2 présente le logo de Python [18].



Illustration 3.2: Le logo de Python

3.3 Organisation des modèles

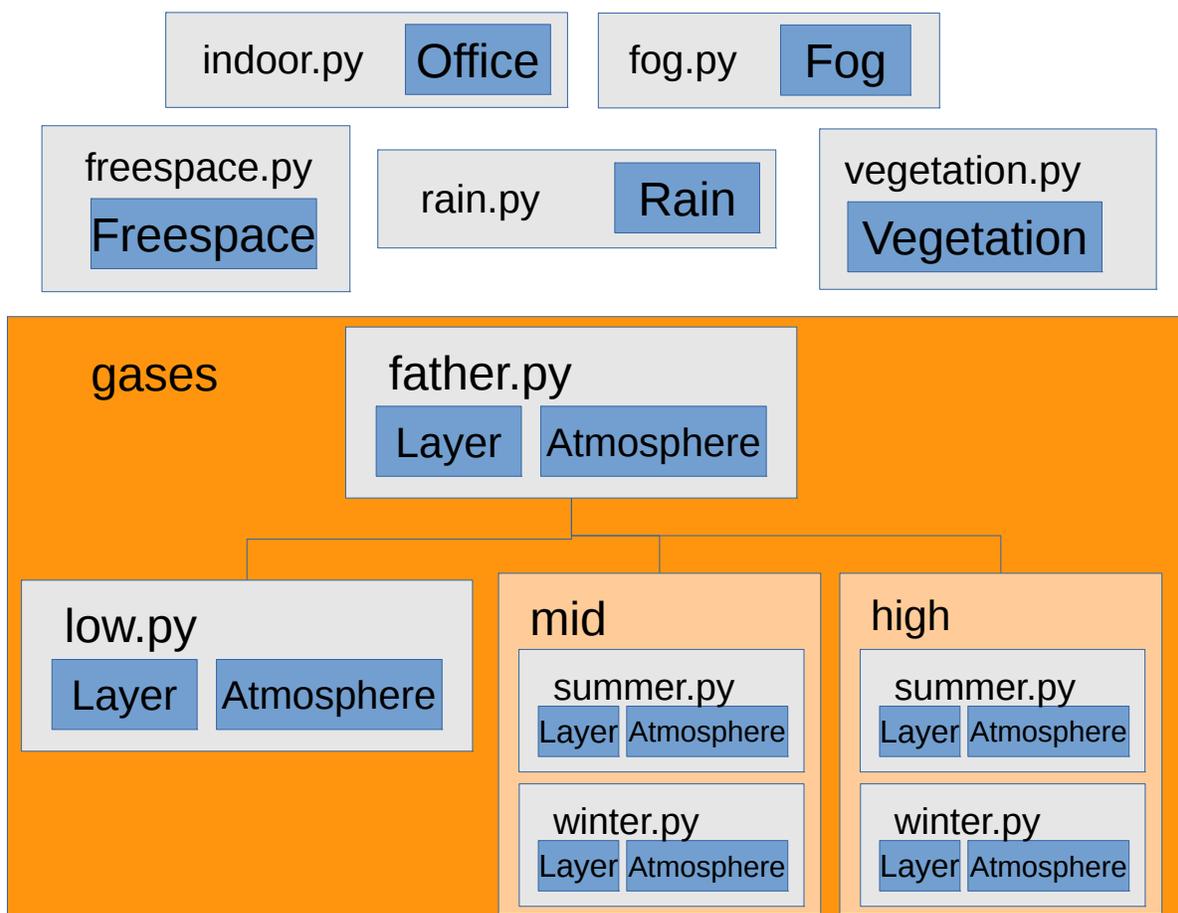


Illustration 3.3: Organisation des modèles

L'organisation des modèles de calcul dépend directement du langage utilisé, certains langages supportent la notion des Packages, d'autres supportent « Header Files », etc. L'illustration 3.3 montre la structure des modèles programmés, dans cette illustration les fichiers sont représentés par la couleur bleue et les répertoires par la couleur orange, les noms des classes sont donnés à l'intérieur du rectangle qui illustre le fichier. Les classes réservées pour l'utilisation interne ne sont pas montrées dans l'illustration. Dans le répertoire gases toutes les classes « Layer » et « Atmosphere » sont héritées de celles du fichier « father.py ».

Tant que le code source de l'application sera disponible, il est plus intéressant de raisonner dans ce manuscrit sur ce que le code fait au lieu sur code lui-même.

Comme il a été déjà signalé, le traitement du modèle le plus intéressant qui est l'atténuation due aux gaz atmosphériques réside dans le dossier « gases ». La référence d'atmosphères standards exige une division du globe terrestre en trois régions. Le fichier consacré pour les petites latitudes est « low.py », dans ces régions il n'y a pas de grande différence entre l'été et l'hiver. Le répertoire « mid » est consacré pour les moyennes latitudes, ce dernier contient deux fichiers « summer.py » pour l'été et « winter.py » pour l'hiver. De la même façon le répertoire « high » contient les deux fichiers « summer.py » pour l'été et « winter.py » pour l'hiver. Chacun de ces 5 fichiers contient 2 classes « Layer » et « Atmosphere » qui héritent de « Layer » et « Atmosphere » du fichier « father.py ». Il est logique de mettre la majorité du traitement dans les classes du fichier « father.py ». Le dernier fichier ne peut pas être utilisé directement. Le modèle a été utilisé tel que l'explique le chapitre 2, mais il peut y avoir une extraction de deux autres informations qui sont la distance électromagnétique et la longitude relative entre l'émetteur et le récepteur. La distance électromagnétique est la plus simple à extraire, il s'agit de la distance réellement traversée par l'onde, ce paramètre est nécessaire pour le calcul des pertes en espace libre à titre d'exemple. Cette distance est simple à calculer et peut être donnée par :

$$D = \sum a_n \quad (3.1)$$

C'est la somme des distances traversées dans chacune des sous-couches.

L'angle entre r_n et r_{n+1} sera notée θ_n , il est clair qu'elle peut être donnée par:

$$\theta_n = \arcsin \left(\frac{a_n \sin \beta_n}{r_n + \varepsilon_n} \right) \quad (3.2)$$

La longitude relative peut être donc :

$$longitude = \sum \theta_n \quad (3.3)$$

L'angle réelle ne peut être que 90 moins la moyenne des β_n additionnée à la longitude relative ou :

$$\psi = 90 - \left(\frac{\sum \beta_n \varepsilon_n}{\sum \varepsilon_n} + longitude \right) \quad (3.4)$$

La notation dans les équations précédentes est basée sur celle du chapitre 2.

Pour le modèle des milieux indoor les spécifications données sont celles utilisées dans le modèle software, mais il importe de signaler que des interpolations ont été utilisées dans cette section pour aboutir à un modèle continu au lieu de celui discret proposé dans la recommandation.

Les modèles de la pluie, les brouillards, la végétation et l'espace libre ont été utilisée sans aucune modification, donc il n'y a pas une nécessité de les mentionner une seconde fois.

Les interfaces aux modèles créés sont les suivantes :

Class Atmosphere:

in: h1(km), h2(km), f(GHz), Beta(°), d(km)

out: EmD(écrase d), longi(longitude relative), angle(élévation réelle °), gasesLoss(dB)

Class Fog:

in: T(K), f(GHz), M(g/m³)

out: attenuation(dB/km)

Class Freespace:

in: f(MHz), d(km)

out: loss (dB)

Class Rain:

in: f(GHz), R(mm/h), elevation=0°, tilt=45°

out: attenuation(dB/km)

Class Vegetation:

in: f(MHz), d(m), theta = 0°

out: loss(dB)

Class Office:

in: f(MHz), d(m), floors(#)

out: loss(dB), fading(dB)

Les paramètres d'entrée et de sortie de l'ensemble des modèles outdoor sont :

in: h1(km), h2(km), G1(dB), G2(dB), Pe(dBw), f(GHz), Phi(°), d(km), Lat(°)

out: EmD(écrase D), Pr(dB), ...

Les paramètres d'entrée et de sortie du modèle indoor sont :

in: f(MHz), d(m), floors(>=1)

out: loss(dB), fading(dB)

3.4 Organisation de l'interface graphique

L'organisation de l'interface graphique est plus complexe que celle des modèles de traitement tant qu'elle doit gérer les effets des composants et accède aux modèles établies, elle a été réalisée sous Python avec l'utilisation du langage Kivy « .kv » afin d'avoir la totalité de contrôle sur l'interface. Le but était la simplicité d'utilisation même si sa réalisation sera compliquée. Il n'y a pas de boutons qui permettent de valider les paramètres d'entrée, par contre le programme détecte que tout les champs sont remplis ou le changement dans ces derniers.

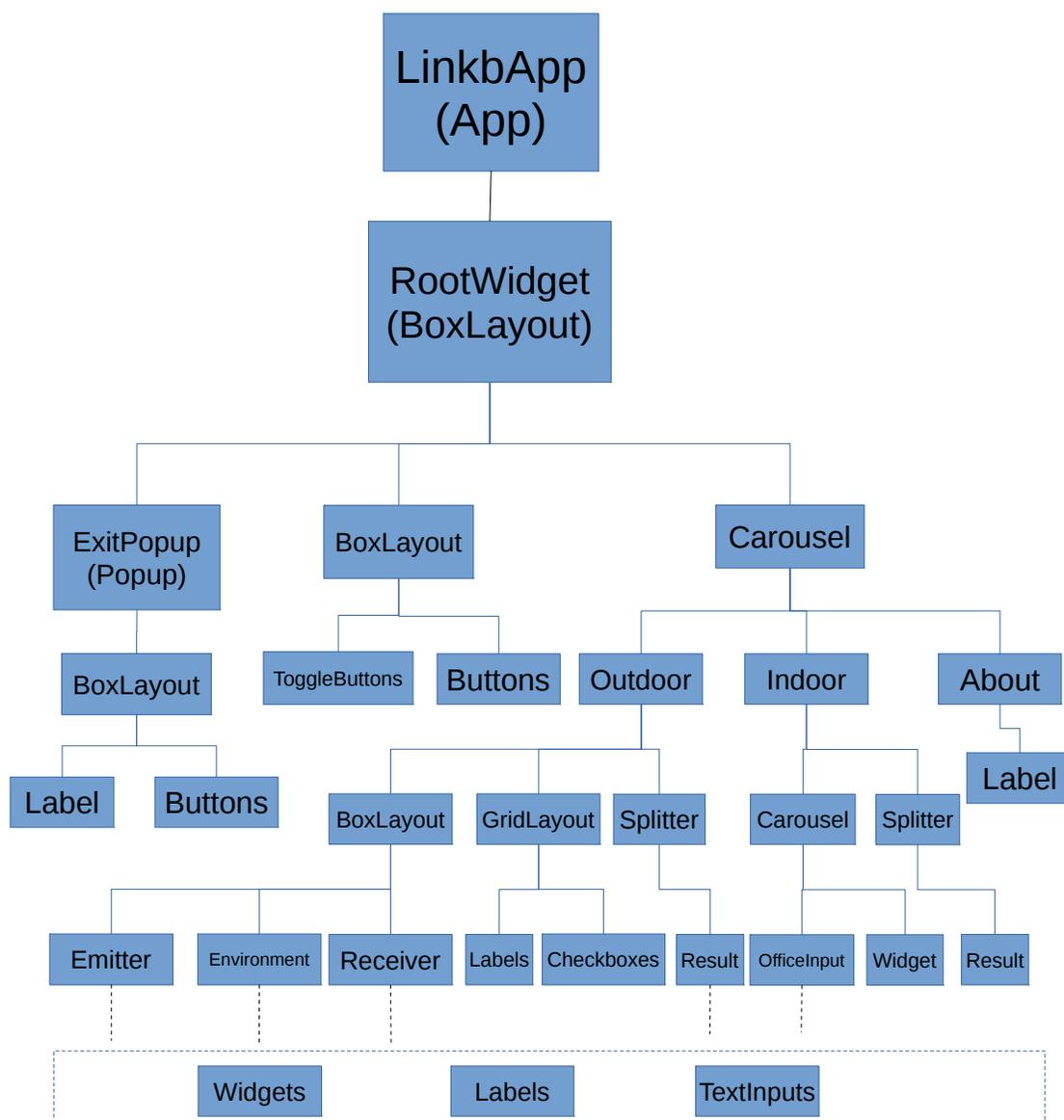


Illustration 3.4: La structure de la classe principale

L'interface graphique reflète d'une façon directe l'ensemble des modèles créés. Les événements associés à chaque niveau, dans la dernière hiérarchie, permettent de vérifier l'ensemble des champs d'entrée. Si tout les champs (sauf celui de la distance si $\varphi > 1^\circ$), les calculs peuvent se lancer, si un « CheckBox » est actif la fonction doit attendre que l'utilisateur remplisse les champs correspondants, ceci est appliqué pour l'ensemble des « CheckBox ». La fonction qui s'occupe du traitement calcule à chaque fois la somme des paramètres d'entrée et décide si le traitement doit se refaire en se basant sur le résultat de comparaison entre l'ancienne somme et la nouvelle. La solution n'est pas la plus idéale, un traitement judicieux pourrait se faire en cherchant une relation directe entre chaque paramètre d'entrée et les différents résultats, cela ajoutera une très grande complexité au programme et la première solution semble plus pratique dans cette situation.

Il sera plus efficace d'expliquer les classes utilisé par des diagrammes au lieu de les donner explicitement tant que la nomination des classes créée ne représente pas une information très importante lors de l'établissement de ce type de manuscrits.

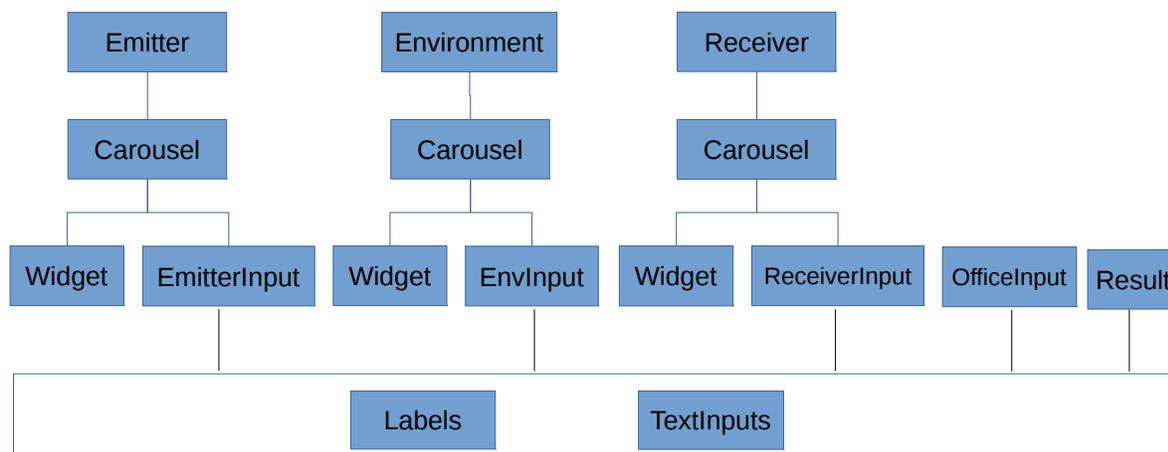


Illustration 3.5: La structure des classes élémentaires de l'interface

Les illustrations 3.4 et 3.5 montrent une hiérarchie des différentes classes utilisées, comme dans le langage Python les parenthèses expriment qu'il y a un héritage dans les illustrations précédentes.

Les images de fond ont été créées en utilisant l'outil Inkscape. Il ne reste que de donner des images sur l'apparence et le fonctionnement de l'application sous les deux modes indoor et outdoor, ce qui est montré dans les illustrations 3.6, 3.7, 3.9, 3.11, 3.8 et 3.10. Le lancement de l'application est simple comme « python main.py ».

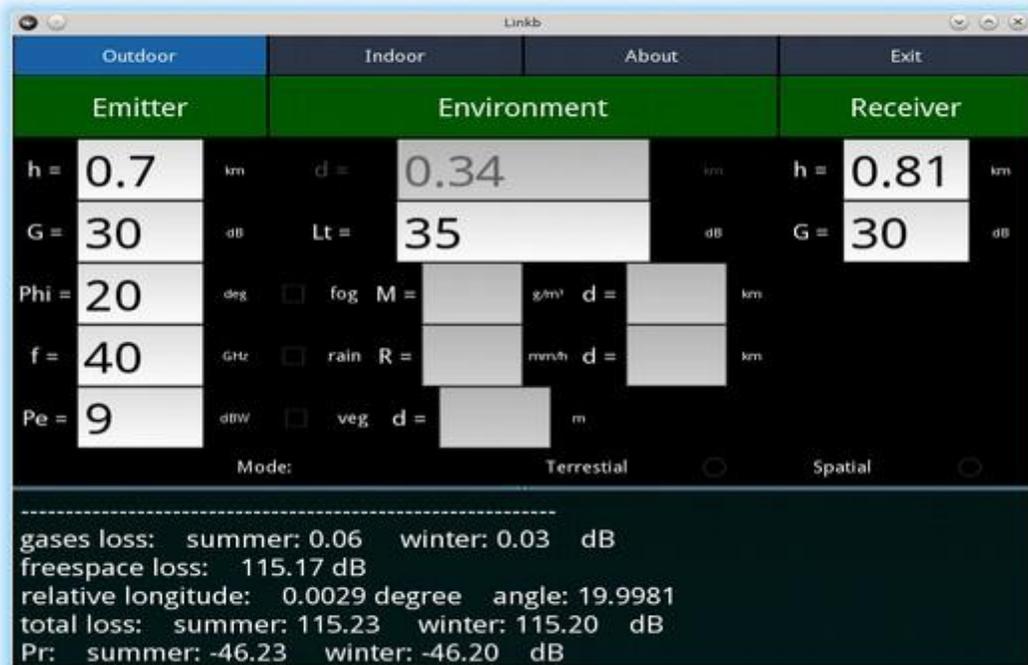


Illustration 3.6: Les champs d'entrée dans le cas Outdoor

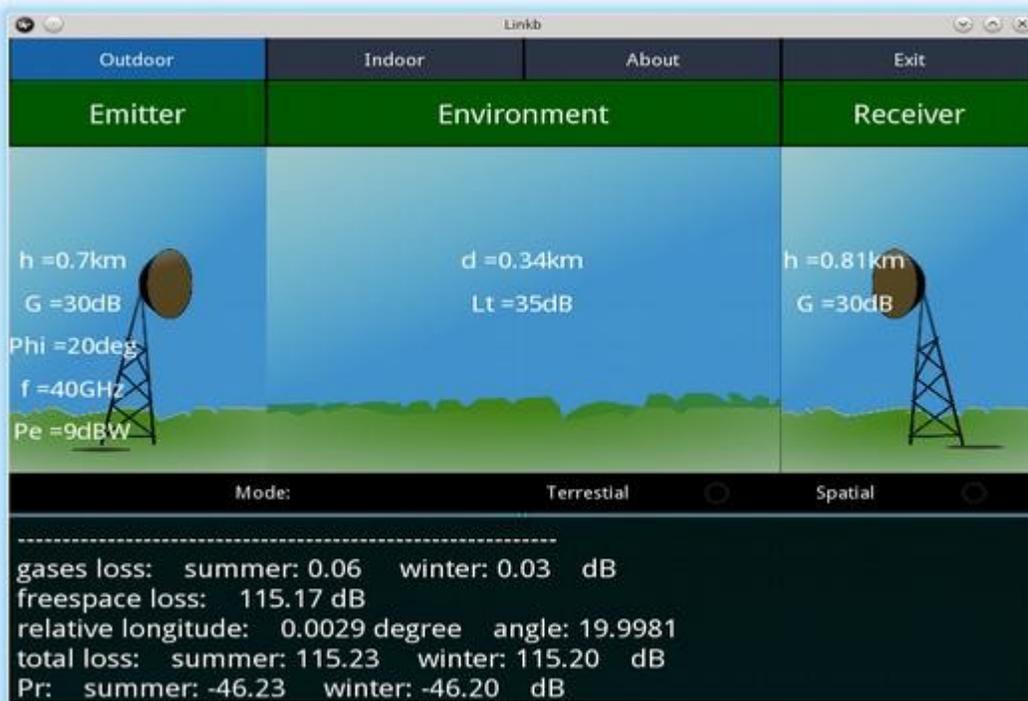


Illustration 3.7: Entrées et Résultats du cas Outdoor

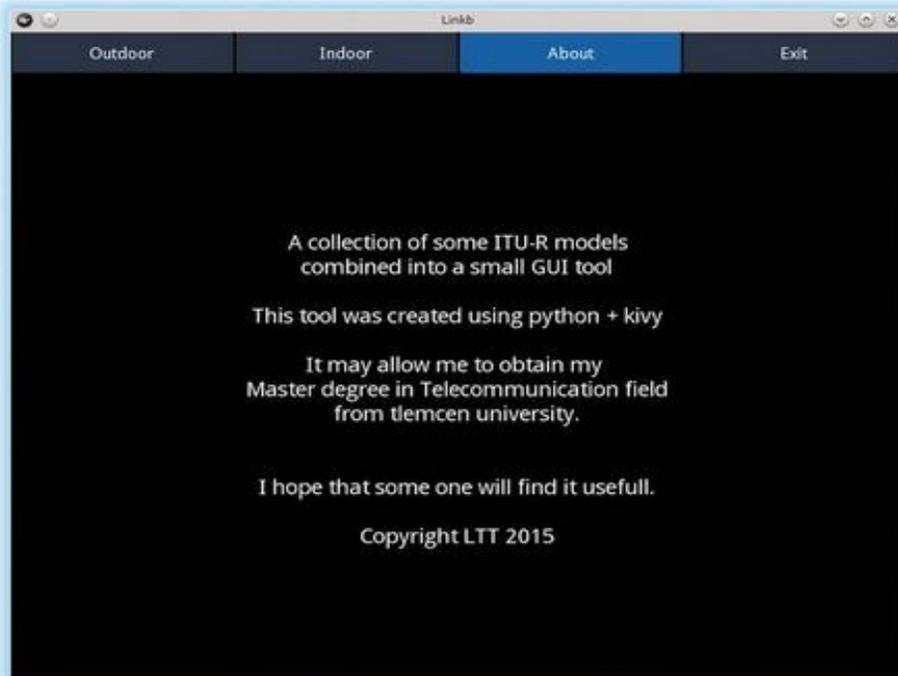


Illustration 3.8: La partie About de l'application



Illustration 3.9: Les champs d'entrée dans le cas Indoor

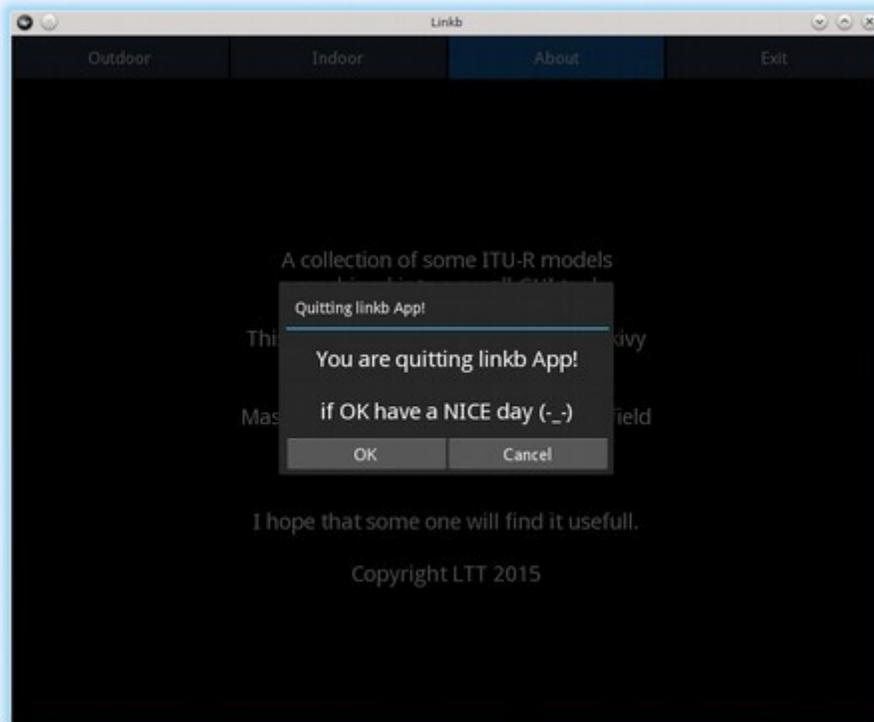


Illustration 3.10: Le bouton Exit dans l'application



Illustration 3.11: Les entrées et les résultats du cas Indoor

3.5 Conclusion

Bien que l'application est relativement simple, son code nécessite une large amélioration, optimisation et documentation sous forme de commentaires pour aboutir à un niveau de code de qualité des programmes libres.

L'application réalisée est capable de répondre aux différents critères imposés. En plus, elle est extensible tant qu'il y a une séparation entre les modèles de traitement, l'apparence et les réactions grâce à l'abstraction du langage Python et l'utilisation du fichier Kivy « .kv ».

Conclusion générale

Le bilan de liaison doit inclure un nombre important de facteurs pour une bonne précision. Ce bilan commence nettement par les principes théoriques de l'électromagnétisme en assimilant le milieu à un espace libre. La précision peut être améliorée en introduisant des modèles empiriques et/ou aléatoires qui peuvent être relativement complexes. Par exemple, pour des fréquences supérieures à 10GHz, l'atténuation due aux gaz devient un paramètre important. L'atténuation totale doit comprendre l'atténuation due à la précipitation et les particules solides dans l'atmosphère lors de la présence de ce type de phénomènes. Les différents types des évanouissements peuvent être causés par les conditions météorologiques et les effets de multi-trajets et ne peuvent être modélisées que par les méthodes aléatoires. Par conséquent il y a nécessité, non pas uniquement des modèles précis, mais aussi des outils software de calcul basés sur ces modèles. Un exemple de ces outils a été réalisé sous forme de Packages Java et Python avec une interface graphique basée sur Kivy, il est présenté par ce manuscrit, certains modèles programmés sont simples mais d'autres sont complexes, le modèle des gaz atmosphériques est un exemple qui appartient à la deuxième catégorie. Un futur développement peut inclure une amélioration des modèles de la précipitation, la végétation, la pluie et les milieux internes, comme il peut y avoir un traitement des évanouissements rapides pour les milieux outdoor, d'autres types de modèles peuvent aussi être programmés afin de comparer les résultats. L'interface graphique peut être largement améliorée puis portée à d'autres plate-formes qui ne sont pas actuellement supportées.

Références

- [1] Thomas Schwengler, Wireless & Cellular Communications, 2014, <http://morse.colorado.edu/~tlen5510/text/classweb.html>
- [2] John S. Seybold, Ph.D., INTRODUCTION TORF PROPAGATION, 2005
- [3] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.618-11 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems, 2013
- [4] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.341-5 The concept of transmission loss for radio links, 1999
- [5] Group Study 3, Recommendation ITU-R P.525-2 Calculation of free-space attenuation, 1994
- [6] Mike Willis, Propagation tutorial, 2015, <http://www.mike-willis.com/>
- [7] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.2001-1 A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz, 2013
- [8] Group Study 3, Recommendation ITU-R P.530-15, 2013
- [9] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.453-10 The radio refractive index: its formula and refractivity data, 2012
- [10] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.835-5 Reference standard atmospheres, 2012
- [11] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.1238-7 Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems, 2012
- [12] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.676-10 Attenuation by atmospheric gases, 2013
- [13] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.833-8 Attenuation in vegetation, 2013
- [14] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005
- [15] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.840-6 Attenuation due to clouds and fog, 2013
- [16] Study Group 3, Recommendation ITU-R P.530-15 Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems, 2013
- [17] The Kivy Authors, Welcome to Kivy, 2014, <http://kivy.org/docs/>
- [18] Python Software Foundation, The Python Tutorial, 2015, <https://docs.python.org/2.7/tutorial/index.html>

Annexe A: Référence d'atmosphères standards

Le modèle divise le globe terrestre en 3 régions en fonction de la latitude et l'année en 2 saisons.

A.1 Petite latitude <22°

Dans ce cas, un seul profil annuel peut être utilisé, tant que les variations saisonnières ne sont pas vraiment importantes dans cette catégorie.

La température $T(K)$ dans l'altitude $h(km)$ est donnée par :

$$T(h) = 300.4222 - 6.3533h + 0.005886h^2 \text{ pour } 0 \leq h < 17$$

$$T(h) = 194 + (h - 17)2.533 \text{ pour } 17 \leq h < 47$$

$$T(h) = 270 \text{ pour } 47 \leq h < 52$$

$$T(h) = 270 - (h - 52)3.0714 \text{ pour } 52 \leq h < 80$$

$$T(h) = 184 \text{ pour } 80 \leq h \leq 100$$

tandis que la pression $P(hPa)$:

$$P(h) = 1012.0306 - 109.0338h + 3.6316h^2 \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] \text{ pour } 10 < h \leq 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp[-0.165(h - 72)] \text{ pour } 72 < h \leq 100$$

ou P_{10}, P_{72} sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

pour la vapeur d'eau (g/m^3) :

$$\rho(h) = 19.6542 \exp[-0.2313h - 0.1122h^2 + 0.01351h^3 - 0.0005923h^4] \text{ pour } 0 \leq h \leq 15$$

$$\rho(h) = 0 \text{ pour } h > 15$$

A.2 Latitude moyenne [22°, 45°]

A.2.1. été

La température $T(K)$ dans l'altitude $h(km)$ est donnée par :

$$T(h) = 294.9838 - 5.2159h - 0.07109h^2 \text{ pour } 0 \leq h < 13$$

$$T(h) = 215.15 \text{ pour } 13 \leq h < 17$$

$$T(h) = 215.15 \exp[(h - 17.)0.008128] \text{ pour } 17 \leq h < 47$$

$$T(h) = 275 \text{ pour } 47 \leq h < 53$$

$$T(h) = 275 + (1 - \exp[(h - 53)0.06])20 \text{ pour } 53 \leq h < 80$$

$$T(h) = 175 \text{ pour } 80 \leq h \leq 100$$

tandis que la pression P(hPa) :

$$P(h) = 1012.8186 - 111.5569h + 3.8646h^2 \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] \text{ pour } 10 < h \leq 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp[-0.165(h - 72)] \text{ pour } 72 < h \leq 100$$

ou P_{10} , P_{72} sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

pour la vapeur d'eau (g/m^3) :

$$\rho(h) = 14.3542 \exp[-0.4174h - 0.02290h^2 + 0.001007h^3] \text{ pour } 0 \leq h \leq 15$$

$$\rho(h) = 0 \text{ pour } h > 15$$

A.2.2. hiver

La température T(K) dans l'altitude h(km) est donnée par :

$$T(h) = 272.7241 - 3.6217h - 0.1759h^2 \text{ pour } 0 \leq h < 10$$

$$T(h) = 218 \text{ pour } 10 \leq h < 33$$

$$T(h) = 218 + (h - 33)3.5571 \text{ pour } 33 \leq h < 47$$

$$T(h) = 255 \text{ pour } 47 \leq h < 53$$

$$T(h) = 255 - (h - 53)2.0370 \text{ pour } 53 \leq h < 80$$

$$T(h) = 210 \text{ pour } 80 \leq h \leq 100$$

tandis que la pression P(hPa) :

$$P(h) = 1018.8627 - 124.2954h + 4.8307h^2 \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] \text{ pour } 10 < h \leq 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp[-0.155(h - 72)] \text{ pour } 72 < h \leq 100$$

ou P_{10} , P_{72} sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

pour la vapeur d'eau (g/m^3) :

$$\rho(h) = 3.4742 \exp[-0.2697h - 0.03604h^2 + 0.0004489h^3] \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$\rho(h) = 0 \text{ pour } h > 10$$

A.3 Grande latitude >45°

A.3.1. été

La température T(K) dans l'altitude h(km) est donnée par :

$$T(h) = 289.8374 - 4.7805h - 0.1402h^2 \text{ pour } 0 \leq h < 10$$

$$T(h) = 255 \text{ pour } 10 \leq h < 23$$

$$T(h) = 225 \exp[(h-23)0.008317] \text{ pour } 23 \leq h < 48$$

$$T(h) = 277 \text{ pour } 48 \leq h < 53$$

$$T(h) = 277 - (h-53)4.0769 \text{ pour } 53 \leq h < 79$$

$$T(h) = 171 \text{ pour } 79 \leq h \leq 100$$

tandis que la pression P(hPa) :

$$P(h) = 1008.0278 - 113.2494h + 3.9408h^2 \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp[-0.140(h-10)] \text{ pour } 10 < h \leq 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp[-0.165(h-72)] \text{ pour } 72 < h \leq 100$$

ou P_{10} , P_{72} sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

pour la vapeur d'eau (g/m^3) :

$$\rho(h) = 8.988 \exp(-0.3614h - 0.005402h^2 - 0.001955h^3) \text{ pour } 0 \leq h \leq 15$$

$$\rho(h) = 0 \text{ pour } h > 15$$

A.3.2. hiver

La température T(K) dans l'altitude h(km) est donnée par :

$$T(h) = 257.4345 + 2.3474h - 1.5479h^2 + 0.08473h^3 \text{ pour } 0 \leq h < 8.5$$

$$T(h) = 217.5 \text{ pour } 8.5 \leq h < 30$$

$$T(h) = 217.5 + (h-30)2.125 \text{ pour } 30 \leq h < 50$$

$$T(h) = 260 \text{ pour } 50 \leq h < 54$$

$$T(h) = 260 - (h - 54)1.667 \text{ pour } 54 \leq h \leq 100$$

tandis que la pression P(hPa) :

$$P(h) = 1010.8828 - 122.2411h + 4.554h^2 \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$P(h) = P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] \text{ pour } 10 < h \leq 72$$

$$P(h) = P_{72} \exp[-0.150(h - 72)] \text{ pour } 72 < h \leq 100$$

ou P_{10} , P_{72} sont les pressions à 10 et 72 km respectivement.

pour la vapeur d'eau (g/m^3) :

$$\rho(h) = 1.2319 \exp(0.07481h - 0.0981h^2 + 0.00281h^3) \text{ pour } 0 \leq h \leq 10$$

$$\rho(h) = 0 \text{ pour } h > 10$$

Annexe B: Calcul de la pression de vapeur d'eau

La pression de vapeur d'eau peut être obtenue à partir de l'humidité relative par :

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (\text{B.1})$$

Où :

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{(b - \frac{t}{d}) \cdot t}{t + c} \right] \quad (\text{B.2})$$

Et :

$$EF_{eau} = 1 + 10^{-4} [7.2 + P \cdot (0.00320 + 5.9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2)] \quad (\text{B.3})$$

$$EF_{glace} = 1 + 10^{-4} [2.2 + P \cdot (0.00382 + 6.4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2)] \quad (\text{B.4})$$

Où :

t température (°C) ;

P pression (hPa).

H humidité relative (%)

e_s pression de la vapeur de saturation (hPa) à la température t (°C) et les coefficients a , b , c et d sont :

pour l'eau

$$a = 6.1121$$

$$b = 18.678$$

$$c = 257.14$$

$$d = 234.5$$

(valide entre -40° et +50°)

pour la glace

$$a = 6.1115$$

$$b = 23.036$$

$$c = 279.82$$

$$d = 333.7$$

(valide entre -80° et 0°)

La pression de la vapeur e peut être obtenue à partir de la densité de vapeur d'eau ρ en utilisant l'équation :

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \text{ hPa} \quad (\text{B.5})$$

avec ρ donnée en g/m^3 .

Annexe C: Les valeurs des différents coefficients du modèle Indoor

Des paramètres typiques basés sur plusieurs résultats sont donnés dans les tables C.1 et C.2 [11].

Pour plusieurs bandes de fréquence où le coefficient de perte d'énergie n'est pas donné pour les bâtiments résidentiels, la valeur donnée pour les bâtiments de bureaux peut être utilisée.

Il faut noter qu'il y aurait une limite dans l'isolation prise en considération à travers plusieurs étages. Le signal peut, également, trouver d'autre chemins externes pour compléter la liaison avec des pertes inférieures à celles dues à la pénétration à travers plusieurs étages.

Fréquence	Résidentiel	Bureau	Commercial
900 MHz	–	33	20
1.2-1.3GHz	–	32	22
1.8-2 GHz	28	30	22
2.4 GHz	28	30	
3.5 GHz		27	
4 GHz	–	28	22
5.2 GHz	30 (appartement) 28 (maison)	31	–
5.8 GHz		24	
60 GHz	–	22	17
70 GHz	–	22	–

Table C.1: Coefficient de perte de puissance

Fréquence	Résidentiel	Bureau	Commercial
900 MHz	–	9(1plafond)	–
		19(2plafonds)	
		24(3plafonds)	
1.8-2 GHz	4n	15+4(n-1)	6+3(n-1)
2.4 GHz	10(appartement)	14	
	5(house)		
3.5 GHz		18(1plafond)	
		26(2plafonds)	
5.2 GHz	13(appartement)	16(1plafond)	–
	7(house)		
5.8 GHz		22(1plafond)	
		28(2plafonds)	

Table C.2: Facteur de pénétration du plafond

Fréquence (GHz)	Résidentiel	Bureau	Commercial
1.8-2	8	10	10
3.5	0	8	0
5.2	–	12	–
5.8	0	17	0

Table C.3: Statistiques des évanouissements rapides

Quand les chemins externes sont exclus, des mesures à 5.2 GHz ont montrées, à une incidence normale, que la moyenne des pertes ajoutées, dues à un étage renforcé est de 20 dB avec une variance de 1.5 dB ; les fixations de lumière augmentent la moyenne jusqu'à 30 dB avec une variance de 3 dB, les couches d'airs internes augmentent les pertes jusqu'à 36 dB avec une variance de 5 dB ; au contraire de L_f , ces valeurs doivent être utilisées dans des modèles spécifiques.

Les statistiques des évanouissements rapides internes suivent une loi log-normale et les variances sont données dans la table C.3 [11].

Les mesures disponibles ont été prises sous certaines conditions ce qui apporte des difficultés lors des comparaisons directes, sachant que seulement les fréquences ont été notées. Quelques conditions peuvent être considérées valables sur la bande 900 à 2000 MHz

- Les chemins avec une composante LOS sont dominées par les pertes en espace libre et ont des coefficients de pertes de puissance due à la distance d'environ 20.
- Les larges chambres ouvertes ont aussi des coefficients de perte de puissance due à la distance

d'environ 20. Cela est peut être dû à une forte composante LOS dans la plupart des surfaces de la chambre.

- La propagation sous la présence des obstacles et à travers des murs augmente le coefficient de distance d'environ 40.
- Pour les longs trajets sans obstacles la 1^{ère} zone de Fresnel peut être altérée ce qui augmentera le même coefficient de 20 jusqu'à 40.
- La décroissance du dernier coefficient lors de l'augmentation de la fréquence n'est pas toujours observé d'un côté et n'est pas facilement à expliquer de l'autre. Cela est peut être expliqué par la petite contribution des signaux diffractés dans la puissance reçue et la zone de Fresnel qui devient de plus en plus étroite dû à l'augmentation de la fréquence.

Annexe D: La partie imaginaire dépendante de la fréquence de la réfractivité complexe

La partie imaginaire de la réfractivité complexe est donnée par :

$$\tilde{N}(f) = \sum_i S_i F_i + \tilde{N}_D(f) \quad (\text{D.1})$$

S_i est l'intensité de la $i^{\text{ème}}$ ligne, F_i est le facteur de forme de la ligne et la somme s'étend sur tout les lignes (pour des fréquences, f , supérieures à la ligne de l'oxygène en 118.750343 GHz, uniquement les lignes de l'oxygène complexes supérieures à 60 GHz doivent être inclus dans la sommation i.e. la somme doit commencer à $i=38$ au lieu de $i=1$).

$\tilde{N}_D(f)$ est le terme continu sec dû à la pression induite du nitrogène et le spectre de Debye.

L'intensité de la ligne est donnée par :

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)] \quad \text{Pour l'oxygène} \quad (\text{D.2})$$

$$S_i = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1-\theta)] \quad \text{Pour la vapeur d'eau} \quad (\text{D.3})$$

P Pression de l'air sec (hPa)

e Pression partielle de la vapeur d'eau (pression barométrique totale, $P_{tot} = P + e$)

$\theta = 300/T$

T température (K)

Des valeurs locales de P , e et T mesurées doivent être utilisées. Dans l'absence de ces informations locales, la référence d'atmosphères standard décrit dans le chapitre précédent peut être utilisée. La pression partielle de la vapeur d'eau e , peut être obtenue de la densité de vapeur d'eau ρ en utilisant l'expression :

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad (\text{D.4})$$

Les coefficients a_1, a_2 sont donnés dans la table D.1 (l'oxygène), b_1, b_2 sont donnés dans la table D.2 (vapeur d'eau).

Le facteur de forme de ligne est donné par : [12]

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (D.5)$$

avec f_i est la fréquence de ligne et Δf est la largeur de la ligne

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0.8 - a_4)} + 1.1 e \theta) \quad \text{Pour l'oxygène} \quad (D.6)$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \quad \text{Pour la vapeur d'eau} \quad (D.7)$$

La largeur de la ligne Δf est modifiée pour introduire l'élargissement de Doppler [12].

$$\Delta f = 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 \Delta f^2 + \frac{2.1316 \cdot 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad \text{Pour la vapeur d'eau} \quad (D.8)$$

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \cdot 10^{-6}} \quad \text{Pour l'oxygène} \quad (D.9)$$

δ est un facteur de correction qui apparaît à cause des effets d'interférence dans les lignes de l'oxygène.

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad \text{Pour l'oxygène} \quad (D.10)$$

$$\delta = 0 \quad \text{Pour la vapeur d'eau} \quad (D.11)$$

L'air sec continu apparaît dans le spectre de Debye non-résonant de l'oxygène pour des fréquences inférieures à 10 GHz et une atténuation de la pression induite du nitrogène pour des fréquences supérieures à 100GHz.

$$\check{N}_D(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6.14 \cdot 10^{-4}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \cdot 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \cdot 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (D.12)$$

Où d est la largeur dans le spectre de Debye [12].

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (D.13)$$

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50.474214	0.975	9.651	6.69	0	2.566	6.85
50.987745	2.529	8.653	7.17	0	2.246	6.8
51.50336	6.193	7.709	7.64	0	1.947	6.729
52.021429	14.32	6.819	8.11	0	1.667	6.64
52.542418	31.24	5.983	8.58	0	1.388	6.526
53.066934	64.29	5.201	9.06	0	1.349	6.206
53.595775	124.6	4.474	9.55	0	2.227	5.085
54.130025	227.3	3.8	9.96	0	3.17	3.75
54.67118	389.7	3.182	10.37	0	3.558	2.654
55.221384	627.1	2.618	10.89	0	2.56	2.952
55.783815	945.3	2.109	11.34	0	-1.172	6.135
56.264774	543.4	0.014	17.03	0	3.525	-0.978
56.363399	1331.8	1.654	11.89	0	-2.378	6.547
56.968211	1746.6	1.255	12.23	0	-3.545	6.451
57.612486	2120.1	0.91	12.62	0	-5.416	6.056
58.323877	2363.7	0.621	12.95	0	-1.932	0.436
58.446588	1442.1	0.083	14.91	0	6.768	-1.273
59.164204	2379.9	0.387	13.53	0	-6.561	2.309
59.590983	2090.7	0.207	14.08	0	6.957	-0.776
60.306056	2103.4	0.207	14.15	0	-6.395	0.699
60.434778	2438	0.386	13.39	0	6.342	-2.825
61.150562	2479.5	0.621	12.92	0	1.014	-0.584
61.800158	2275.9	0.91	12.63	0	5.014	-6.619
62.41122	1915.4	1.255	12.17	0	3.029	-6.759
62.486253	1503	0.083	15.13	0	-4.499	0.844
62.997984	1490.2	1.654	11.74	0	1.856	-6.675
63.568526	1078	2.108	11.34	0	0.658	-6.139
64.127775	728.7	2.617	10.88	0	-3.036	-2.895
64.67891	461.3	3.181	10.38	0	-3.968	-2.590
65.224078	274	3.8	9.96	0	-3.528	-3.680
65.764779	153	4.473	9.55	0	-2.548	-5.002
66.302096	80.4	5.2	9.06	0	-1.660	-6.091
66.836834	39.8	5.982	8.58	0	-1.680	-6.393
67.369601	18.56	6.818	8.11	0	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.64	0	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.17	0	-2.492	-6.600
68.960312	1.334	9.65	6.69	0	-2.773	-6.650

118.750334	940.3	0.01	16.64	0	-0.439	0.079
368.498246	67.4	0.048	16.4	0	0	0
424.76302	637.7	0.044	16.4	0	0	0
487.249273	237.4	0.049	16	0	0	0
715.392902	98.1	0.145	16	0	0	0
773.83949	572.3	0.141	16.2	0	0	0
834.145546	183.1	0.145	14.7	0	0	0

Table D.1: Données spectroscopique de l'oxygène

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22.23508	0.113	2.143	28.11	0.69	4.8	1
67.80396	0.0012	8.735	28.58	0.69	4.93	0.82
119.99594	0.0008	8.356	29.48	0.7	4.78	0.79
183.310091	2.42	0.668	30.5	0.64	5.3	0.85
321.225644	0.0483	6.181	23.03	0.67	4.69	0.54
325.152919	1.499	1.54	27.83	0.68	4.85	0.74
336.222601	0.0011	9.829	26.93	0.69	4.74	0.61
380.197372	11.52	1.048	28.73	0.54	5.38	0.89
390.134508	0.0046	7.35	21.52	0.63	4.81	0.55
437.346667	0.065	5.05	18.45	0.6	4.23	0.48
439.150812	0.9218	3.596	21	0.63	4.29	0.52
443.018295	0.1976	5.05	18.6	0.6	4.23	0.5
448.001075	10.32	1.405	26.32	0.66	4.84	0.67
470.888947	0.3297	3.599	21.52	0.66	4.57	0.65
474.689127	1.262	2.381	23.55	0.65	4.65	0.64
488.491133	0.252	2.853	26.02	0.69	5.04	0.72
503.568532	0.039	6.733	16.12	0.61	3.98	0.43
504.482692	0.013	6.733	16.12	0.61	4.01	0.45
547.67644	9.701	0.114	26	0.7	4.5	1
552.02096	14.77	0.114	26	0.7	4.5	1
556.936002	487.4	0.159	32.1	0.69	4.11	1
620.700807	5.012	2.2	24.38	0.71	4.68	0.68
645.866155	0.0713	8.58	18	0.6	4	0.5
658.00528	0.3022	7.82	32.1	0.69	4.14	1
752.033227	239.6	0.396	30.6	0.68	4.09	0.84
841.053973	0.014	8.18	15.9	0.33	5.76	0.45
859.962313	0.1472	7.989	30.6	0.68	4.09	0.84
899.306675	0.0605	7.917	29.85	0.68	4.53	0.9
902.616173	0.0426	8.432	28.65	0.7	5.1	0.95
906.207325	0.1876	5.111	24.08	0.7	4.7	0.53
916.171582	8.34	1.442	26.7	0.7	4.78	0.78
923.118427	0.0869	10.22	29	0.7	5	0.8
970.315022	8.972	1.92	25.5	0.64	4.94	0.67
987.926764	132.1	0.258	29.85	0.68	4.55	0.9
1 780.000000	22 300.0000	0.952	176.2	0.5	30.5	5

Table D.2: Données spectroscopiques de la vapeur d'eau