

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
Faculté d'Electronique et d'Informatique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**
En : ELECTRONIQUE

Spécialité : Rayonnement Atmosphérique

Par
DERMECHE Nassim

Thème

INFLUENCE DE LA SURFACE TERRESTRE SUR LA PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Soutenu publiquement le 17/10/2011, devant le jury constitué de :

Mr. R. OUSSAID	Maître de Conférences/A, à l'USTHB	Président
Mr. B. HADDAD	Professeur à l'USTHB	Directeur de mémoire
Mr. M. BELHADJ-AISSA	Maître de Conférences/A, à l'USTHB	Examineur
Mr. S. MEKAOUI	Maître de Conférences/A, à l'USTHB	Examineur
Mr. M. TOUNSI	Maître de Conférences/A, à l'USTHB	Examineur

Remerciement

Ma profonde gratitude et mes remerciement à mon directeur de mémoire Monsieur HADDAD Boualem, Professeur à l'USTHB, pour la confiance qu'il a placé en moi en me proposant ce sujet, pour son aide et ses précieux conseil, dont il m'a gratifiés, pour son expérience dont il m'a fait bénéficier et qui ma permis de mener à bien ce projet.

Ma sincère reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je tiens à remercier Messieurs les membres du jury, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Mes remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour me permettre d'achever ce travail.

Dédicace

*À mes très cher parents, qui mon permis de devenir
ce que*

Je suis aujourd'hui

À mon frère Salim

À Sam

À toute ma famille

À Farid et sa petite famille

À mes amis

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : propagation des ondes électromagnétiques	04
I.1 Introduction	05
I.2 La propagation troposphérique	06
I.2.1 Propagation radioélectrique en espace libre	06
I.2.2 Propagation radioélectrique en visibilité	07
I.2.2.1 Liaison en visibilité	08
I.2.2.2 Affaiblissement dans l'atmosphère	09
I.2.2.2.1 Affaiblissement par les gaz	09
I.2.2.2.2 Affaiblissement par les hydrométéores	10
I.2.2.3 Réflexion sur le sol	11
I.2.2.3.1 Réflexion spéculaire	12
I.2.2.3.2 Réflexion diffuse	14
I.2.2.4 Réfraction dans l'atmosphère	15
I.2.2.4.1 Indice de réfraction	15
I.2.2.4.2 Trajectoire des ondes radioélectriques	16
I.2.2.4.3 Rayon de courbure	17
I.2.3 Propagation radioélectrique en non-visibilité	19
I.2.3.1 Diffraction autour de la surface terrestre	20
I.2.3.2 Diffraction par le sommet d'arêtes d'épaisseur relativement faible	21
I.2.3.3 Diffusion par les hétérogénéités	23
I.2.3.3.1 Diffusion troposphérique	24
I.2.3.3.2 Diffusion par la pluie	24
I.2.3.4 Réflexion sur les couches élevées	26
I.2.3.5 Propagation par conduit	27
I.3 Présentation du logiciel Radio Mobile	29
I.3.1 Performances du logiciel Radio Mobile	29
I.3.2 Les données d'entrée	29
I.3.3 Caractéristiques des données SRTM	30
I.3.4 Format des fichiers	30
I.3.5 Simulation d'une liaison radio	31

I.4 Conclusion	34
Chapitre II : Caractérisation de la région Sétifienne	35
II.1 Introduction	36
II.2.1 Topographie de la région de Setif	36
II.2.1.1 Une zone montagneuse au Nord	36
II.2.1.2 Une zone des hautes plaines	37
II.2.1.3 Une lisière au Sud	38
II.2.2 Climat	38
II.3 Caractérisation du sol	38
II.3.1 Analyse de la structure du sol	40
II.3.1.1 Site de Megriss	40
II.3.1.2 Site de Ain Arnat	41
II.4 Conclusion	42
Chapitre III : Radar météorologique	43
III.1 Introduction	44
III.2 Principe de fonctionnement d'un radar pulsé	44
III.3 Caractéristiques du radar	45
III.3.1 La résolution	45
III.3.1.1 Résolution radiale	45
III.3.1.2 Résolution transversale	46
III.3.2 Volume de résolution d'impulsion	46
III.4 Equation du radar pour les cibles météorologiques	46
III.5 Paramètres de conception d'un radar météorologique	51
III.5.1 Effets de l'atténuation	51
III.5.2 L'ambiguïté en distance et vitesse	52
III.5.2.1 L'ambiguïté en distance	52
III.5.2.2 L'ambiguïté en vitesse	52
III.5.3 Les échos du sol	53
III.6 Conclusion	53
Chapitre IV : Résultats et interprétations.	54
IV.1 Introduction	55
IV.2 Extraction du MNT à partir du logiciel Radio Mobile	55
IV.3 Caractéristiques techniques du radar de Sétif	56

IV.4 Présentation de l'image des échos radar de Megriss	57
IV.5 Simulation des échos du sol avec le logiciel Radio Mobile	57
IV.6.1 Comparaison entre les échos du sol réels et simulés par le radar de Megriss	60
IV.6.2 Etude du site de Ain Arnat	61
IV.6.2.1 Echos du sol par rapport à la hauteur de l'antenne	61
IV.6.2.1 Echos du sol par rapport à l'ouverture du faisceau	63
IV.7 Site radar de Bordeaux France	64
IV.8 Site radar de Dakar Sénégal	66
IV.9 Conclusion	68
Conclusion générale	69
Bibliographie	72

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le Big-bang qui a vu l'apparition de l'univers d'une façon générale et la terre particulièrement, cette dernière n'a pas cessé de se mouvoir et de se transformer parfois violemment et souvent très lentement pour avoir au final sa forme actuelle et sa morphologie. Nous pouvons constater que la surface terrestre de part sa forme diversifiée influe considérablement sur la manière et particulièrement sur la propagation des ondes électromagnétiques.

L'optique traite des phénomènes de réflexion, de réfraction, de diffusion et de diffraction, ces phénomènes s'appliquent aussi aux ondes hertziennes. Parmi les missions dévolues aux télécommunications, l'une d'entre elles consiste à l'établissement d'une liaison stable entre deux points de la planète. Les conditions de succès d'une telle opération consistent en l'évaluation des probabilités et des chances pour réaliser un lien Hertzien.

La première partie de ce travail portera sur l'étude de cette influence. Pour ce faire nous présenterons le logiciel Radio Mobile dans la simulation d'un lien radio avec toutes ses performances.

Par ailleurs nous pouvons avancer que l'un des instruments dont le fonctionnement est basé sur la diffusion d'ondes électromagnétiques est le radar.

Le radar est un instrument dont l'usage a été introduit au cours des années cinquante pour l'observation des phénomènes atmosphériques et pour permettre les prévisions météorologiques par l'observation des nuages, des vents, des précipitations etc. Son aptitude permet d'assurer une couverture continue dans le temps et l'espace des précipitations. C'est un instrument qui permet aussi de comprendre la formation de phénomènes extrêmes (cyclones, tornades, ouragans). Pour cela, la radarmétéorologie est devenue une discipline à part entière. Comme explicité plus haut, les performances du radar sont très perturbées par des échos provenant de la surface terrestre qui réduisent les performances de cet instrument au regard des erreurs induites dans l'estimation des précipitations et l'identification des nuages. Parmi les approches d'élimination des échos parasites, nous citons les techniques dites doppler, polarimétriques ou statistiques. Il existe aussi une autre démarche qui consiste à bien choisir l'emplacement du radar afin de minimiser ces échos parasites.

Dans ce contexte nous nous proposons d'utiliser le modèle numérique de terrain (M.N.T)

Introduction générale

La deuxième partie de ce travail portera sur l'application de MNT SRTM pour l'élaboration de la cartographie des échos du sol de trois sites radar de topographies différentes. Il s'agit des régions de Sétif (Algérie), Bordeaux (France) et Dakar (Sénégal).

Compte tenu de cet objectif, notre mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de notions sur la propagation des ondes électromagnétiques, et une simulation à partir du logiciel Radio Mobile d'un lien radio.
- Le second chapitre porte sur la caractérisation topographique et climatique de la région Sétifienne.
- Le troisième chapitre présente le radar météorologique.
- Le quatrième chapitre décrit l'application du MNT SRTM à l'élaboration de la cartographie des échos du sol.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

I.1 Introduction

Les liaisons radioélectriques du réseau terrestre fixe (FH, WIFI, WIMAX, ...), mobile (GSM, UMTS, ...) ou à très haut débit à courte portée sont situées soit à l'intérieur de la troposphère, siège de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques (présence de gradient d'indice de réfraction, hydrométéores : pluie, neige, brouillard, etc.), soit au-dessus du sol avec son lot d'obstacles (bâtiments, végétation...), soit encore à l'intérieur des bâtiments.

L'étude des bilans de telles liaisons nécessite de prendre en compte les différents affaiblissements (affaiblissement en espace libre, affaiblissement en excès qui regroupe l'ensemble des affaiblissements supplémentaires dûs aux différents effets de l'environnement : gaz, hydrométéores, bâtiments, végétation, etc.) et les différents renforcements du signal entre l'émetteur et le récepteur (gains d'antennes, focalisation, etc.). Différents mécanismes de propagation entrent en jeu : la réflexion, la réfraction, la transmission, la diffusion, ... etc.

L'indice de réfraction joue un rôle important dans la troposphère. Les gradients de l'indice de réfraction dans le profil vertical créent des couches de guidage du rayonnement électromagnétique. Si l'étendue horizontale de ces couches de guidage est suffisante, elles provoquent des variations parfois importantes du niveau du signal direct, des variations d'angles d'arrivée et l'apparition de trajets multiples qui interfèrent au niveau du récepteur.

Le sol, les bâtiments, la végétation apportent leur lot de rayons : on distingue en effet les rayons réfléchis sur le sol, sur les différentes façades des bâtiments ou sur les différentes cloisons à l'intérieur des bâtiments, les rayons diffractés sur les sommets élevés ou sur les arêtes horizontales et verticales des bâtiments situés dans l'axe de la liaison, les rayons diffusés sur le couvert végétal, les rayons guidés dans les conduits, les rues, les couloirs des bâtiments, ... etc.

Aux fréquences supérieures à 10 GHz, les ondes électromagnétiques interagissent avec l'atmosphère neutre et les divers phénomènes météorologiques tels que les hydrométéores (pluie, neige, grêle) pour engendrer une absorption et une diffusion d'énergie et donc un affaiblissement des signaux transmis.

Les besoins sans cesse croissants des télécommunications en matière de débit nécessitent d'avoir une modélisation de plus en plus précise du canal de propagation dans des conditions d'environnement, de gammes de fréquence, des largeurs de bande...etc, toujours plus diverses.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

Cette modélisation permet de dimensionner au mieux les interfaces radio en terme de qualité, d'optimiser les réseaux lors de leur déploiement (détermination des zones de couverture (choix des sites, allocation des fréquences, définition des puissances, gains d'antenne...etc)) et de déterminer les brouillages éventuels.

Les modèles sont de différents types : on distingue les modèles déterministes, empiriques et semi-empiriques.

Les modèles déterministes s'appuient sur les lois fondamentales de la physique. Ils servent de modèles de référence. Le temps de calcul est par contre relativement élevé.

Les modèles empiriques sont basés sur l'analyse d'un grand nombre de mesures expérimentales en fonction de différents paramètres tels que la fréquence, la distance, la hauteur des antennes. Ils sont robustes, rapides et ne nécessitent pas de bases de données géographiques. Ils sont adaptés au dimensionnement des systèmes mais peu précis plus particulièrement à courtes distances.

Les modèles semi-empiriques combinent une formulation analytique des phénomènes physiques (réflexion, transmission, diffraction, diffusion) et un ajustement statistique à l'aide de mesures expérimentales. Ils sont rapides, précis et robustes. Ils nécessitent par contre la prise en compte de l'environnement (troposphère, bases de données géographiques (topographie, occupation du sol, morphologie, contours des bâtiments, axe de rue),...etc.).

Dans ce chapitre nous allons analyser la propagation troposphérique et les mécanismes physiques qui entrent en jeu lors des liaisons hertziennes.

I.2 La propagation troposphérique

Les phénomènes mis en jeu dans une liaison troposphérique tant en visibilité qu'en non visibilité ont retenu depuis longtemps l'attention de la communauté scientifique [Boithias, 1984]

I.2.1 Propagation radioélectrique en espace libre

On désigne sous ce terme, la propagation dans un milieu illimité et homogène où n'existent que l'émetteur et le récepteur associés à leur antenne. Ces différents éléments sont de dimension négligeable par rapport à la distance qui les sépare. Aucun obstacle ne vient d'autre part perturber la propagation entre l'émetteur et le récepteur.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

La relation fondamentale entre la puissance reçue P_r et la puissance émise P_t est donnée par [Ducastell, 1961] :

$$P_r = G_e G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} P_t \quad (\text{I.1})$$

Avec :

G_e et G_r : respectivement les gains des antennes d'émission et de réception,

λ : la longueur d'onde (m),

d : la distance entre l'émetteur et le récepteur (m).

Cette relation, généralement dénommée « équation fondamentale des télécommunications », ou « équation de Friis pour les anglo-saxons », est à la base des calculs et des mesures de propagation.

La quantité $\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$ est souvent appelée affaiblissement en espace libre A_0 .

L'affaiblissement total de propagation (A) comprend en plus de l'affaiblissement en espace libre (A_0), un affaiblissement supplémentaire A_s qui traduit l'influence de nombreux facteurs d'environnement (gaz, hydrométéores ..., etc.), effet de masque dû à des obstacles (bâtiments, murs, cloisons, meubles, personnes, végétation ..., etc.) ou variabilité due aux interférences. Dans la pratique, il faut également tenir compte des pertes dans les lignes d'alimentation des antennes (*feeder*), et, plus généralement, de tous les dispositifs qui s'insèrent entre les émetteurs ou les récepteurs et les antennes.

I.2.2 Propagation radioélectrique en visibilité

La présence de la Terre et de l'atmosphère met en jeu différents mécanismes physiques (réflexion, réfraction, diffraction, diffusion) qui viennent modifier les conditions de propagation et influencer le niveau du champ reçu même si les deux extrémités de la liaison sont en visibilité radioélectrique. Après avoir défini la notion de visibilité radioélectrique, nous examinerons les différents mécanismes physiques rencontrés : affaiblissement (gaz, hydrométéores (pluie, brouillard, nuage, grêle)), réflexion sur le sol, réfraction dans l'atmosphère, diffraction, etc.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

I.2.2.1 Liaison en visibilité

L'étude des ondes électromagnétiques entre un émetteur E et un récepteur R conduit à subdiviser l'espace de propagation en une famille d'ellipsoïdes, appelés ellipsoïdes de Fresnel, ayant comme foyers les points E et R, tels qu'un point quelconque M d'un de ces ellipsoïdes (voir figure I.1) :

Le rayon du n^e ellipsoïde en un point du parcours situé à la distance d_1 de E et à la distance d_2 de R ($d_1 + d_2 = d$, sous réserve que les distances d_1 et d_2 soient grandes par rapport aux rayons des ellipsoïdes) est donné par la relation suivante [Uijlenhoet et Steiner, 2003]:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (I.2)$$

Avec :

n : un nombre entier qui caractérise l'ellipsoïde considéré ($n = 1$ caractérise le 1er ellipsoïde de Fresnel...),

λ : la longueur d'onde.

Le rayon du 1^{er} ellipsoïde est égal à :

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (I.3)$$

La valeur maximale au milieu du trajet du rayon du 1^{er} ellipsoïde est donc :

$$r_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d} \quad (I.4)$$

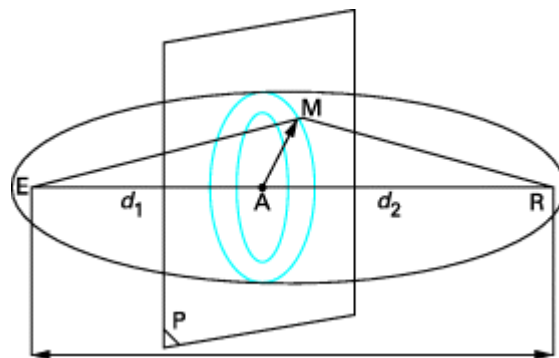


Figure I.1 - Représentation schématique des zones de Fresnel

On considère qu'une liaison est en visibilité radioélectrique si le 1^{er} ellipsoïde de Fresnel délimitant la région de l'espace où passe la quasi-totalité de l'énergie est

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

dégagé (ne contient aucun obstacle). Les phénomènes de diffraction par des obstacles éventuels situés au-delà du 1^{er} ellipsoïde de Fresnel ont donc une influence négligeable sur le niveau reçu. Le rayon de l'ellipsoïde étant inversement proportionnel à la fréquence, il en résulte qu'il faut élever d'autant plus les antennes que les fréquences sont basses.

I.2.2 Affaiblissement dans l'atmosphère

I.2.2.1 Affaiblissement par les gaz

L'affaiblissement par les gaz résulte de la résonance moléculaire de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

La molécule d'oxygène possède un moment magnétique permanent. Son couplage avec le champ magnétique d'une onde électromagnétique incidente provoque une absorption par résonance à certaines fréquences. Aux environs de 60 GHz on observe un couplage entre le moment intrinsèque de l'électron (spin) et l'énergie rotationnelle de la molécule qui génère une série de raies d'absorption assez proches les unes des autres dans le spectre.

La molécule de vapeur d'eau se comporte comme un dipôle électrique. Son interaction avec une onde incidente désoriente la molécule en générant une énergie potentielle interne supplémentaire. Le maximum d'atténuation atteint aux environs de 22 GHz résulte de la résonance de la molécule d'eau qui se met à tourner sur elle-même en absorbant une forte proportion de l'énergie électromagnétique incidente.

La figure I.2 montre la variation de l'affaiblissement linéique dû à l'oxygène et à la vapeur d'eau. Une manière très précise pour estimer l'affaiblissement par les gaz est de tenir compte de la contribution de l'ensemble des raies d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau et du spectre continu d'absorption lié à l'eau et la glace. Différents modèles existent dans la littérature. Le modèle de référence est celui de Liebe et al (1993). Il permet de calculer l'indice de réfraction lié à l'oxygène et à la vapeur d'eau dans l'atmosphère ainsi que l'affaiblissement causé par chacun de ces composants, pour des fréquences allant jusqu'à 1 000 GHz. Les paramètres d'entrée de ce modèle sont la pression, la température, l'humidité relative relevées sur un profil vertical de l'atmosphère terrestre ainsi que la fréquence.

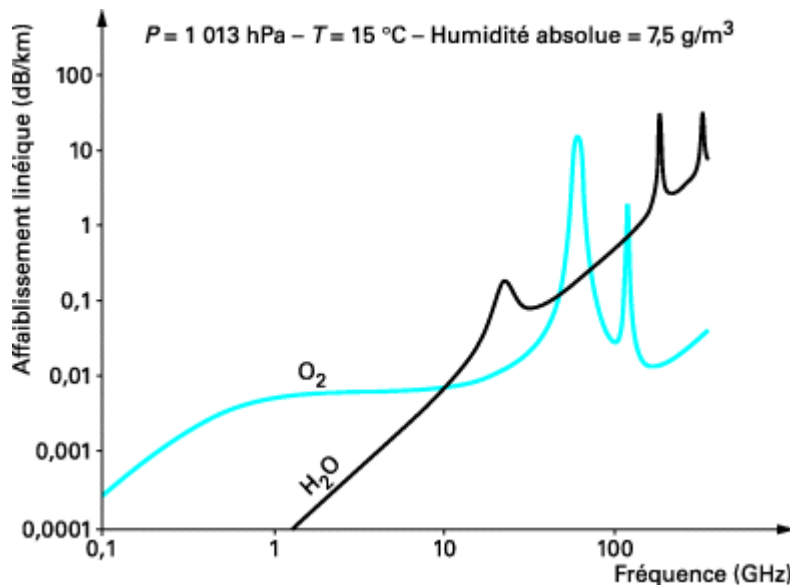


Figure I.2 - Affaiblissement linéique (dB/km) dû aux gaz de l'atmosphère (O₂ et H₂O) [Liebe et al, 1993]

Application numérique : l'affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère est, pour une atmosphère moyenne ($7,5\text{ g/m}^3$), de l'ordre de 0,2 dB/km et 15 dB/km respectivement à 20 et 60 GHz.

I.2.2.2.2 Affaiblissement par les hydrométéores

L'affaiblissement dû à la pluie se fonde plus particulièrement sur la connaissance des intensités de précipitation. Pour une intensité de 20 mm/h (valeur dépassée pendant 0,1 % du temps à Belfort), les ordres de grandeur des affaiblissements dus à la pluie sont de 2 et 8 dB/km respectivement à 20 et 60 GHz. Pour une intensité de 40 mm/h valeur dépassée pendant 0,01 du temps, les valeurs sont de l'ordre de 3,2 et 13 dB/km.

La figure I.3 montre la variation de l'affaiblissement linéique (dB/km) dû à la pluie recommandé par UIT-R P.837.

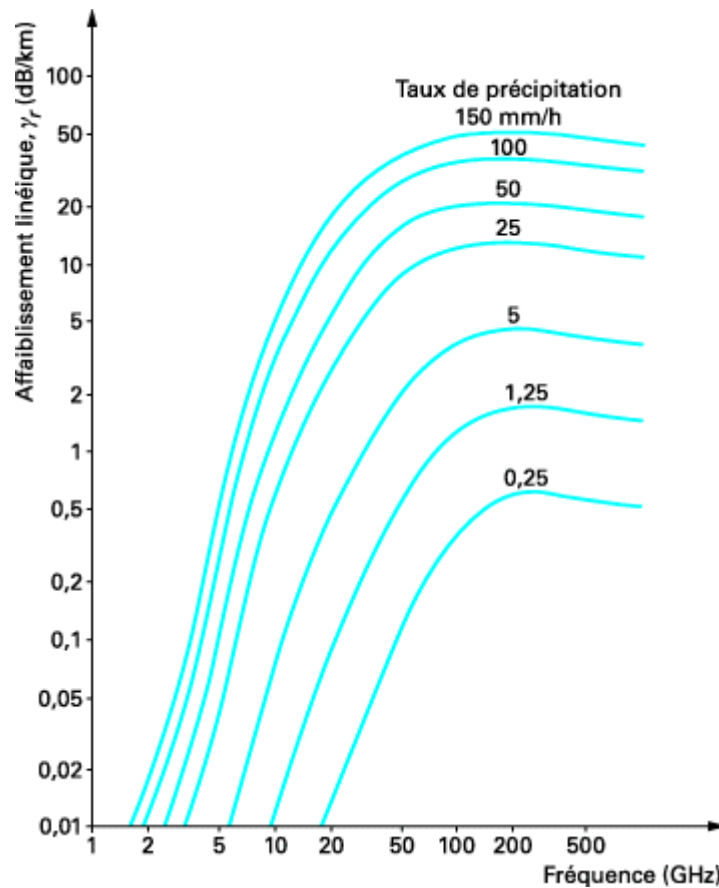


Figure I.3 - Affaiblissement linéique (dB/km) dû à la pluie en fonction de la fréquence pour différents taux de précipitation [Liebe et al, 1993]

I.2.2.3 Réflexion sur le sol

On a réflexion lorsque l'onde rencontre une surface dont les dimensions sont grandes et les irrégularités petites par rapport à la longueur d'onde. Le champ réfléchi est lié au champ incident par l'intermédiaire des relations de Fresnel. On distingue la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse (voir figure I.4).

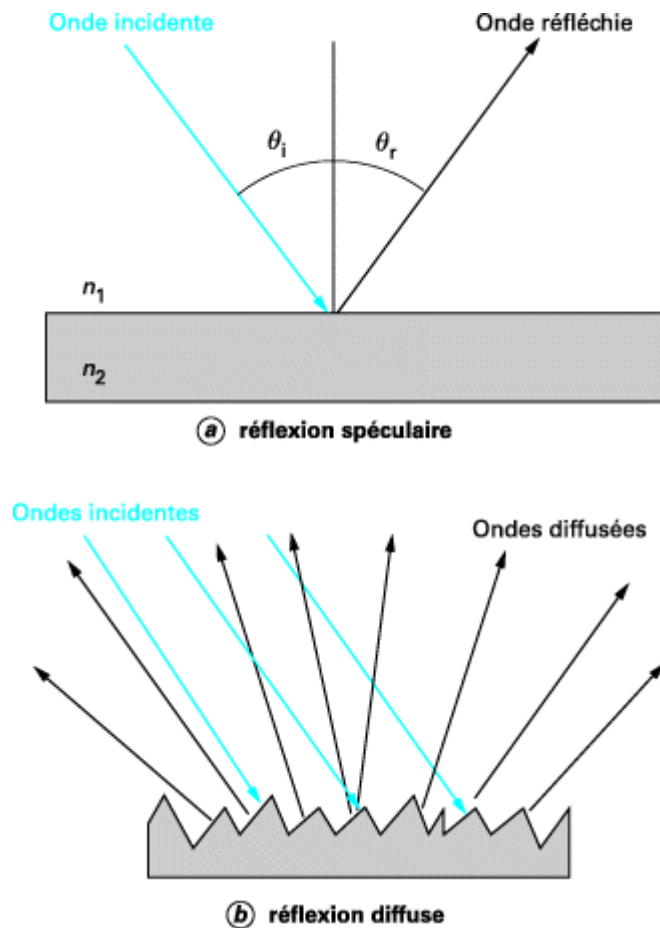


Figure I.4 - Représentation schématic de la réflexion spéculaire et diffuse

I.2.2.3.1 Réflexion spéculaire

La réflexion spéculaire, phénomène commun à toutes les fréquences, est celle due à une surface homogène parfaitement plane. Elle est due à des obstacles tels que le sol, les façades d'immeubles et les surfaces planes. L'affaiblissement de propagation induit par de telles réflexions découle des relations de Fresnel et dépend des caractéristiques diélectriques de la surface réfléchissante (conductivité σ , permittivité relative ε_r ou permittivité relative complexe $\varepsilon'_r = \varepsilon_r - j60\delta\lambda$). La perméabilité magnétique relative est toujours voisine de l'unité.

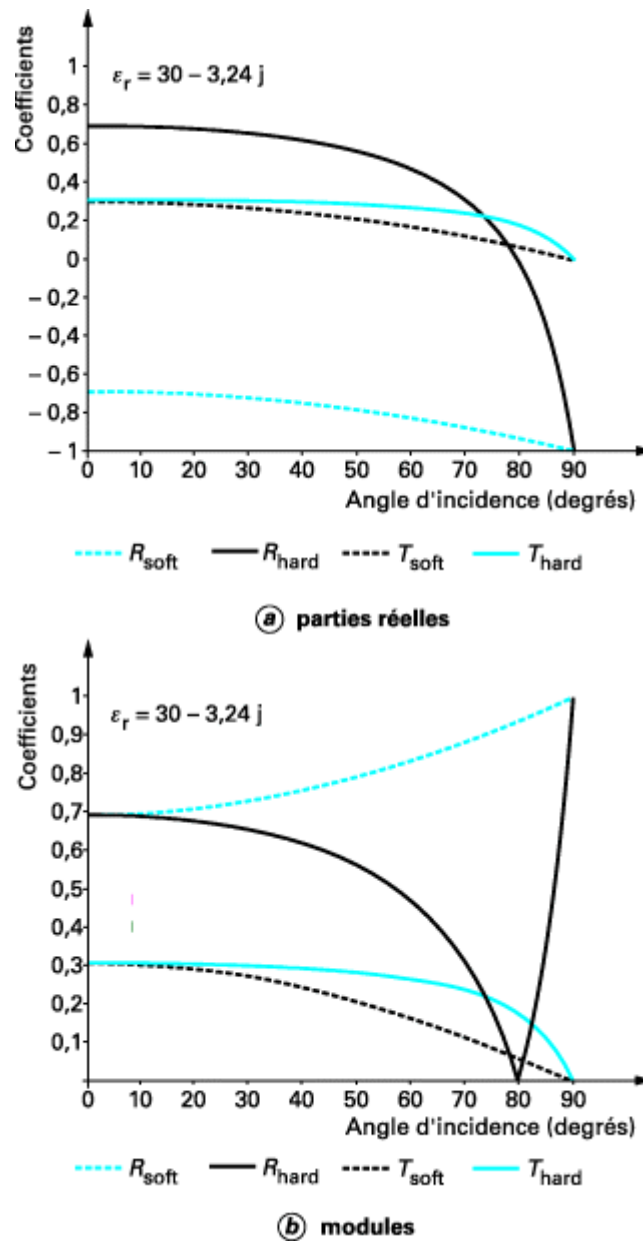


Figure I.5 - Exemple de variation de la partie réelle et du module des coefficients de réflexion R et de transmission T du sol humide à 1 GHz en polarisation verticale (hard) et horizontale (soft) [Sizun,2008]

Les figures I.5 a et b donnent un exemple de la variation des coefficients (partie réelle et module) de réflexion et de transmission en polarisation verticale (*hard*) et horizontale (*soft*) du sol humide à 1 GHz.

Le sol humide à cette fréquence est caractérisé par une permittivité relative égale à 30 et une conductivité égale à 0,18 (S/m).

Sur le sol en incidence rasante, c'est-à-dire pour des angles d'inclinaison très petits (angle d'incidence voisin de 90°), le facteur de réflexion est toujours voisin de

– 1 ; la réflexion se fait avec inversion de phase quelle que soit la polarisation. En polarisation horizontale, le facteur de réflexion reste voisin de – 1 pour des angles d'inclinaison assez grands. En polarisation verticale au contraire, il décroît jusqu'à un minimum qui est d'autant plus petit que la fréquence est élevée (incidence brewstérienne) puis croît au-delà (voir figure I.5b). Lorsque l'angle d'inclinaison atteint 90° (incidence normale), les deux polarisations sont équivalentes.

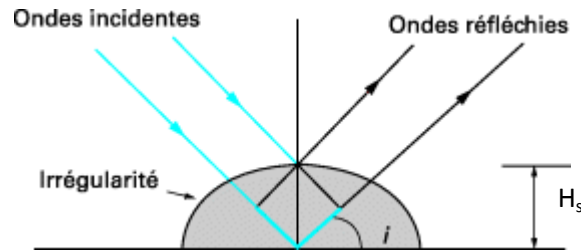


Figure I.6 - Différence de marche créée par une irrégularité de surface de hauteur H_s

I.2.2.3.2 Réflexion diffuse

La réflexion diffuse est due aux réflexions par des surfaces qui ne sont pas planes mais rugueuses ; les surfaces présentant des inégalités de hauteur en différents points. Il en résulte qu'une onde incidente n'est plus réfléchie dans une direction unique mais diffusée dans de multiples directions. Afin de préciser si une réflexion est diffuse ou spéculaire, on utilise généralement le critère de Rayleigh, à savoir la considération de la hauteur des irrégularités de la surface (H_s) et l'angle d'inclinaison (i). L'irrégularité de hauteur H_s (voir figure I.6) va alors créer, pour deux ondes réfléchies par la surface, une différence de marche, et donc une différence de phase.

Lorsque la hauteur H_s est suffisamment petite pour que ces deux ondes soient en phase, on se trouve dans le cas précédent de réflexion spéculaire. Sinon la surface est considérée comme rugueuse. En résumé, la réflexion est diffuse selon le critère de Rayleigh, lorsque $\Delta\Phi > \pi/2$ c'est-à-dire lorsque $H_s > \lambda/8 \sin(i)$. La rugosité dépend donc de la fréquence, de l'angle d'incidence et de la hauteur des irrégularités.

Il est possible de calculer la puissance réfléchie par une surface rugueuse en multipliant le coefficient de réflexion spéculaire pour chacune des polarisations horizontale H_s et verticale V par un coefficient de diffusion ρ [Boithias, 1984] :

$$R_{V,H_s}^{mod} = R_{V,H_s} \times \rho \quad (I.5)$$

$$\rho = e^{\left[-8\pi^2 \left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2 \cos^2 \theta\right]} \quad (I.6)$$

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

Avec :

σ_h : écart type de la distribution des hauteurs des irrégularités.

θ : l'angle d'incidence par rapport à la normale.

I.2.2.4 Réfraction dans l'atmosphère

I.2.2.4.1 Indice de réfraction

En radioélectricité, la troposphère est considérée comme un diélectrique d'indice de réfraction proche de l'unité, mais dont les variations, bien que petites, vont jouer un rôle important.

L'indice de réfraction n est donné par :

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

ε_r : constante diélectrique relative,

μ_r : perméabilité relative.

La valeur moyenne de l'indice de réfraction n au niveau du sol varie autour de 1,000 3. Les variations portant sur les cinquièmes et sixièmes décimales, on utilise le co-indice N qui donne une valeur pratique de l'indice n . Ces deux indices sont reliés par la formule suivante [Boithias, 1984] :

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (\text{I.8})$$

Le co-indice peut être obtenu soit en le mesurant directement à l'aide d'un réfractomètre, soit en le calculant à partir de données météorologiques, à l'aide de la relation suivante :

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{\theta}{T^2} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

T : température absolue en °K,

P : pression atmosphérique en hPa (ou mbar),

e : pression partielle de vapeur d'eau en hPa :

$$e = \frac{He_s}{100} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

H : humidité relative de l'air (quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air en pourcentage par rapport à la quantité maximale que cet air pourrait en contenir à la même température),

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

e_s : pression de la vapeur saturante ; elle est reliée à la température de l'air t (°C) par l'expression suivante :

$$e_s = ae^{\left(\frac{bt}{t+c}\right)} \quad (\text{I.11})$$

Les valeurs des coefficients a , b et c pour l'eau liquide sont :

$$a = 6,112 \text{ 1}, b = 17,502 \text{ et } c = 240,97.$$

Ces relations sont applicables entre -20°C et $+50^\circ\text{C}$ avec une précision de 0,2 %.

Le premier terme de l'expression de N , fonction de la pression et de la température, est la composante sèche ; le second terme, fonction de l'humidité et de la température, est la composante humide. La composante sèche est la composante la plus forte, elle contribue à la valeur du co-indice pour 60 à 80 %. Des abaques donnent la valeur des composantes sèche et humide en fonction des différents paramètres météorologiques. En été, la composante humide a tendance à augmenter et la composante sèche a tendance à diminuer. En hiver, la composante humide est faible alors que la composante sèche tend à croître en raison des faibles températures.

Comme la pression, la température et l'humidité varient en fonction de l'altitude, l'indice de l'air varie également en fonction de la distance et de l'altitude. Ces variations dépendent essentiellement de phénomènes climatiques tels que la subsidence, les radiations nocturnes..., et de la nature du sol (présence d'eau sur le sol). La variabilité avec la distance est surtout très forte sur les trajets mixtes (terre-mer) où le passage d'îles est très marqué. La variabilité verticale, généralement la seule prise en considération, a une très grande importance en propagation.

I.2.2.4.2 Trajectoire des ondes radioélectriques

La trajectoire suivant laquelle se déplace l'énergie radioélectrique est appelée rayon. La propagation des ondes dans la troposphère est principalement fonction de la valeur de l'indice de réfraction et du gradient d'indice.

Dans un milieu continu (milieu où l'indice de réfraction $n(h)$ varie de façon continue avec l'altitude), cette loi s'écrit (loi de Descartes) (voir figure I.7):

$$\varphi(h) = \frac{\pi}{2} - \theta(h) \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$\phi(h)$: angle entre le rayon et l'horizontale, à l'altitude h .

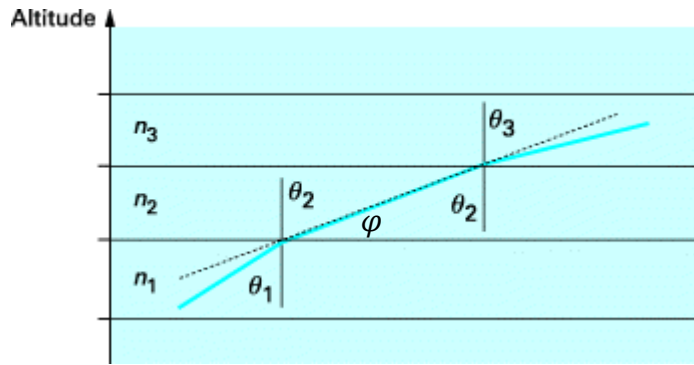


Figure I.7 - Géométrie associée à la définition de la loi de Descartes

Lorsque la stratification est à géométrie sphérique, il est nécessaire de modifier cette relation. L'application de la loi de Descartes à un milieu à géométrie sphérique est appelée loi de Bouguer. Pour un milieu continu, on a :

$$n(h).r(h). \cos \phi(h) = cte \quad (I.13)$$

Avec :

$\phi(h)$: angle entre le rayon et l'horizontale locale à l'altitude h ,

$r(h)$: égal à $(a + h)$ où a est une référence arbitraire prise par rapport au centre de symétrie sphérique. Par exemple si le centre de la Terre est pris comme centre de symétrie, a aura la valeur du rayon terrestre (environ 6 370 km).

I.2.2.4.3 Rayon de courbure

Un rayon radioélectrique traversant la troposphère subit des courbures dues au gradient vertical de l'indice de réfraction. La courbure du rayon en un point de l'espace est alors contenue dans le plan vertical et s'exprime sous la forme :

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{\cos \phi}{n} \frac{dn}{dh} \quad (I.14)$$

Avec :

ϕ : angle de la trajectoire du rayon avec l'horizontale.

La courbure des rayons est définie comme étant positive lorsque sa concavité est orientée vers la surface de la Terre. Ce phénomène ne dépend pratiquement pas de la fréquence si le gradient de l'indice ne varie pas d'une façon significative sur une distance égale à la longueur d'onde.

Si les antennes sont au voisinage du sol, on a $\cos \phi = 1$ et comme $n \approx 1$, on peut écrire :

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} = -\frac{1}{10^6} \frac{dN}{dh} \quad (\text{I.15})$$

On voit alors que la courbure de la trajectoire est proportionnelle au gradient du co-indice et, si celui-ci est constant, les trajectoires sont des arcs de cercle.

En particulier, pour une atmosphère standard caractérisée par un gradient vertical égal à -39 N/km (gradient normal du co-indice de réfraction), le rayon de courbure est de $25\,640 \text{ km}$, soit environ 4 fois le rayon de courbure de la Terre. C'est une valeur conventionnelle du gradient vertical du co-indice utilisée pour les études de réfraction. Elle correspond approximativement à la valeur médiane du gradient sur le premier kilomètre d'altitude dans les régions tempérées.

Si la valeur algébrique du gradient du co-indice est supérieure à -39 unités N/km , on dit qu'il y a infra-réfraction. En particulier si le gradient est nul, l'atmosphère est linéaire, les trajectoires sont des droites.

Si la valeur algébrique du gradient du co-indice est inférieure à -39 unités N/km , on dit qu'il y a super-réfraction. Les trajectoires sont courbées vers le sol.

Pour un gradient de -157 unités N/km , le rayon de courbure des trajectoires est égal à celui de la Terre, le rayon est donc parallèle à la surface de la Terre.

Si toutefois le gradient est inférieur à -157 unités N/km , la courbure des trajectoires est supérieure à la courbure terrestre. Les rayons reviennent vers le sol où ils sont généralement réfléchis. On dit qu'il y a propagation par conduit. L'énergie des ondes radioélectriques reste confinée et se propage avec un affaiblissement très inférieur à ce qu'il serait dans une atmosphère homogène. Il y a propagation guidée (voir figure I.8).

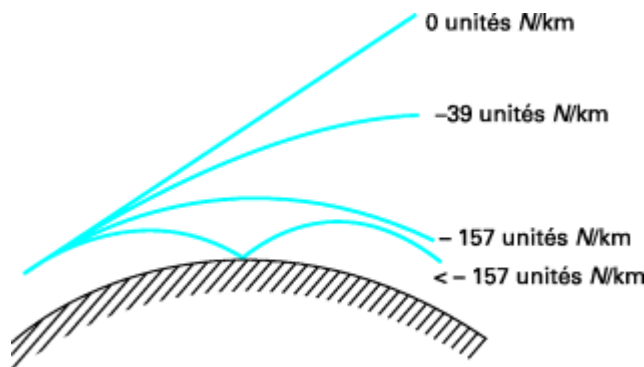


Figure I.8 - Trajectoire des ondes radioélectriques en fonction du gradient du co-indice

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

On distingue deux types principaux de conduits : les conduits de surface (la limite inférieure est au sol) et les conduits élevés. Ils sont caractérisés par leur épaisseur (différence d'altitude entre les surfaces limites, inférieure et supérieure), leur hauteur (hauteur au-dessus du sol de la surface inférieure du conduit élevé) et leur intensité (différence entre les valeurs maximale et minimale du module de l'indice de réfraction).

Des conditions météorologiques ou géographiques particulières conduisent à des valeurs de gradient du co-indice qui s'écartent notablement de la valeur standard. Ainsi des inversions temporaires de température dans l'atmosphère ont pour conséquence de dévier les faisceaux radioélectriques vers le haut et conduire ainsi à des interruptions des communications. Ces phénomènes apparaissent parfois l'hiver sur des liaisons de télévision.

Afin de tenir compte de la réfraction, les méthodes numériques de tracé de rayons dans l'atmosphère terrestre utilisent généralement un rayon terrestre équivalent. C'est le rayon d'une Terre fictive, sphérique et sans atmosphère de telle sorte que les trajets radioélectriques soient rectilignes. Les altitudes et les distances le long du sol sont les mêmes que sur la Terre réelle supposée entourée d'une atmosphère dont le gradient vertical du co-indice est constant. Pour une atmosphère ayant un gradient normal du co-indice, le rayon terrestre équivalent est égal approximativement aux $4/3$ du rayon réel de la terre, ce qui correspond à environ 8 500 km. Le facteur multiplicatif du rayon terrestre (rapport du rayon terrestre équivalent au rayon réel de la Terre) est lié au gradient vertical dn/dh de l'indice de réfraction et au rayon terrestre a par la relation :

$$k = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}} \quad (\text{I.16})$$

Des méthodes numériques (méthode de l'équation parabolique, méthode de l'équation intégrale...) permettent d'évaluer le champ électromagnétique en tout point d'une coupe verticale en fonction des profils des indices de réfraction.

I.2.3 Propagation radioélectrique en non-visibilité

On considère qu'une liaison est en non-visibilité radioélectrique si le 1^{er} ellipsoïde de Fresnel délimitant la région de l'espace où passe la quasi-totalité de l'énergie est, dû à la présence d'obstacle, très loin d'être dégagé.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

Les phénomènes de diffraction par des obstacles éventuels situés au voisinage de la liaison ont donc une influence importante sur le niveau reçu. Ces conditions sont toujours réalisées lorsque l'une des extrémités de la liaison est au-delà de l'horizon de l'autre. Elles peuvent également être réalisées lorsqu'elle est en deçà de l'horizon lorsque les dimensions de l'ellipsoïde de Fresnel sont importantes plus particulièrement en ondes décimétriques et en ondes plus longues.

Les mécanismes physiques permettant aux ondes électromagnétiques de contourner les obstacles constitués par le relief et la courbure de la terre sont :

- la diffraction autour de la surface terrestre supposée sphérique ;
- la diffraction par le sommet d'arêtes d'épaisseur relativement faible ;
- la diffusion par les hétérogénéités.
- la réflexion sur les couches élevées.
- la propagation par conduit.

I.2.3.1 Diffraction autour de la surface terrestre

La diffraction des ondes autour de la sphère terrestre est l'un des problèmes de propagation les plus anciennement étudiés sous l'appellation de propagation par onde de sol. À la suite des travaux de mathématiciens tels que Poincaré, Sommerfeld, Van der Pol, Bremmer [Van der Pol et Bremmer, 1950], l'expression générale du champ radioélectrique est donnée par la relation suivante :

$$\frac{E}{E_0} = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n(d) g_n(h_1) g_n(h_2) \quad (\text{I.17})$$

Avec :

E : le champ en un point,

E_0 : le champ en espace libre à la même distance,

d : la distance entre l'émetteur et le récepteur mesurée le long du grand cercle,

h_1 et h_2 : les hauteurs des antennes au-dessus de la sphère terrestre,

$A_n(d)$ et $g_n(h)$: sont des fonctions complexes respectivement de la distance et de la hauteur de chaque antenne. Elles dépendent également des caractéristiques du sol, de la fréquence et de la polarisation [Boithias, 1984].

I.2.3.2 Diffraction par le sommet d'arêtes d'épaisseur relativement faible

La diffraction se produit lorsqu'une onde rencontre l'arête d'un obstacle (montagne, colline, bâtiments, etc.) dont les dimensions sont grandes devant la longueur d'onde. Elle constitue l'un des facteurs les plus importants intervenant dans la propagation des ondes radioélectriques.

L'utilisation de la Théorie Géométrique de la Diffraction (TGD) permet de représenter ce phénomène sous forme de rayons. La théorie montre que l'affaiblissement supplémentaire (hors espace libre) de la diffraction (donné par la GTD (*Geometrical Theory of Diffraction*) ou UTD (Théorie Uniforme de la Diffraction)) a une dépendance en fréquence en $10 \lg(f)$ pour ce qui est de la diffraction par une arête. Elle est très présente pour la propagation des ondes dans les bandes de fréquences allant jusqu'à quelques GHz. Au-delà et notamment pour des fréquences supérieures à 15 GHz, l'affaiblissement de diffraction peut devenir considérable par rapport à un simple affaiblissement de réflexion.

Afin d'évaluer un ordre de grandeur de l'affaiblissement par diffraction dans les bandes de fréquences qui nous intéressent, considérons une arête sans épaisseur au sommet à la hauteur h (positive ou négative) par rapport à la droite qui joint l'émetteur du récepteur. Soit d la distance totale, d_1 et d_2 les distances respectives de l'arête à l'émetteur et au récepteur (voir figure I.9).

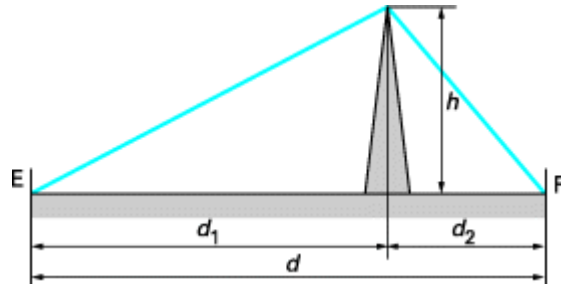


Figure I.9 - Représentation schématique d'une arête vive diffractante

Si l'on prend comme variable :

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (\text{I.18})$$

Le champ à l'emplacement du récepteur est donné en amplitude et en phase, par rapport à l'espace libre, par l'expression suivante [Ducastell, 1961]:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1+j} \int_v^{\infty} e^{j\frac{\pi t^2}{2}} dt \quad (\text{I.19})$$

Où E_0 est le champ existant en l'absence d'arête.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

Le rapport des puissances correspondantes s'écrit alors :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} - \xi(v) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - \eta(v) \right)^2 \right] \quad (I.20)$$

En désignant par $\xi(v)$ et $\eta(v)$ les intégrales de Fresnel :

$$\xi(v) = \int_0^v \cos \frac{\pi t^2}{2} dt \text{ et } \eta(v) = \int_0^v \sin \frac{\pi t^2}{2} dt \quad (I.21)$$

Si v est négatif, c'est-à-dire lorsque le sommet de l'arête est au-dessous de la droite reliant l'émetteur au récepteur, P/P_0 tend en oscillant vers le niveau d'espace libre, tandis que pour v positif, P/P_0 décroît régulièrement à mesure que l'obstruction de l'arête augmente. Pour v nul, l'émetteur et le récepteur sont alignés avec le sommet de l'arête et l'affaiblissement est de 6 dB (en optique on a la visibilité tandis qu'en radio on perd 6 dB).

Dans le cas de l'obstruction, nous avons des expressions approchées :

$$10 \log \frac{P}{P_0} = -13 - 20 \log v \quad (I.22)$$

Relation valable plus particulièrement pour $v > 1,5$

$$10 \log \frac{P}{P_0} = -6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} - v + 0,1 \right] \quad (I.23)$$

Plus particulièrement valable pour $v > -0,7$ et utilisable au voisinage de 0.

La figure I.10 donne le niveau d'atténuation en fonction de la hauteur de l'arête par rapport à l'axe émetteur-récepteur.

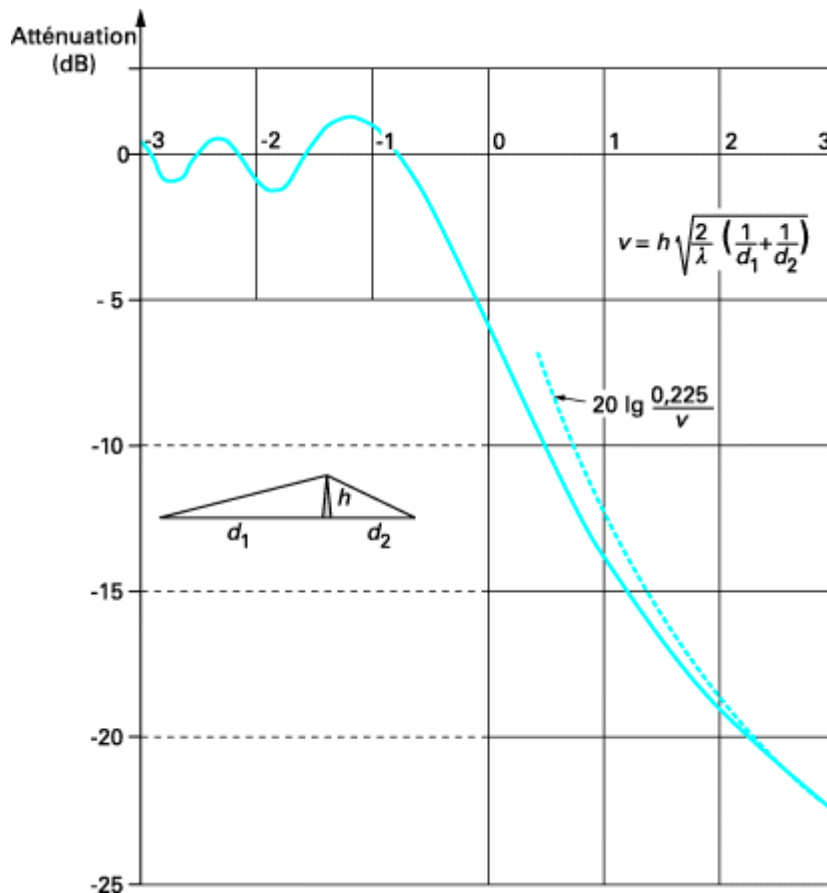


Figure I.10 - Atténuation due à la diffraction par une arête [Deygou,1966]

Dans la littérature, on trouve plusieurs autres modèles qui décrivent les phénomènes de diffraction. Les modèles les plus courants sont ceux de Bullington, Longley-Rice, Deygout [Deygou, 1966]. Ce sont des modèles qui se sont beaucoup inspirés des travaux de Van Der Pol, Bremmer et Norton. Par ailleurs, ces modèles évoluent continuellement afin de se rapprocher le plus possible de la réalité (modèle à plusieurs arêtes...).

I.2.3.3 Diffusion par les hétérogénéités

L'atmosphère réelle n'est pas homogène. Elle est en perpétuel mouvement. Son indice de réfraction présente des variations spatio-temporelles importantes. Il peut subir en effet en chaque point des fluctuations très rapides et de faibles amplitudes liées aux mouvements tourbillonnaires des particules d'air. Il peut contenir d'autre part des particules non gazeuses telles que gouttes de pluie, grêlons, poussières, etc. Ces différentes hétérogénéités présentes au sein de l'atmosphère terrestre vont permettre la propagation des ondes électromagnétiques en non-visibilité par diffusion. On distingue plus particulièrement la diffusion troposphérique et la diffusion par la pluie.

I.2.3.3.1 Diffusion troposphérique

La diffusion troposphérique est liée aux fluctuations de l'indice de réfraction. Le mécanisme de propagation de l'onde électromagnétique par diffusion troposphérique est le suivant (voir figure I.11). Les hétérogénéités de l'indice de réfraction situées dans le volume commun aux faisceaux des antennes, reçoivent de l'énergie de l'antenne d'émission, en renvoient une petite partie dans toutes les directions et en particulier vers l'antenne de réception. Comme ces hétérogénéités fluctuent avec le temps, le niveau d'énergie reçu subit les mêmes fluctuations. L'étude de l'énergie reçue comporte donc deux étapes, l'étude du niveau moyen reçu d'une part, l'étude des fluctuations autour de ce niveau moyen d'autre part.

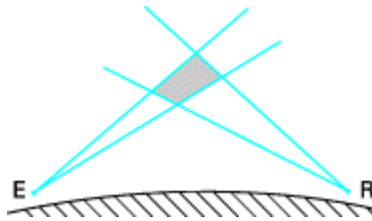


Figure I.11 - Propagation d'une onde électromagnétique par diffusion troposphérique

La figure I.12 donne un exemple de diffusion troposphérique observée sur une liaison de 105 km sur la plaine d'Alsace à 468,915 et 2 208 MHz.

I.2.3.3.2 Diffusion par la pluie

Contrairement à la diffusion troposphérique due à la présence permanente d'hétérogénéités de l'indice de réfraction au sein de l'atmosphère, la diffusion par la pluie n'apparaît que lorsqu'il pleut dans le volume commun des faisceaux d'antennes.

Si le diamètre des gouttes de pluie est relativement petit par rapport à la longueur d'onde, la section efficace de diffusion d'une goutte de pluie (rapport de la puissance diffusée à la puissance surfacique de l'onde incidente) est proportionnelle au carré du volume de la particule. Elle est donnée par la relation de Rayleigh :

$$\sigma_i = \pi^5 \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right)^2 \frac{D_i^6}{\lambda^4} \quad (\text{I.24})$$

Avec :

ε : la permittivité de l'eau,

D_i : le diamètre de la goutte de pluie i ,

λ : la longueur d'onde.

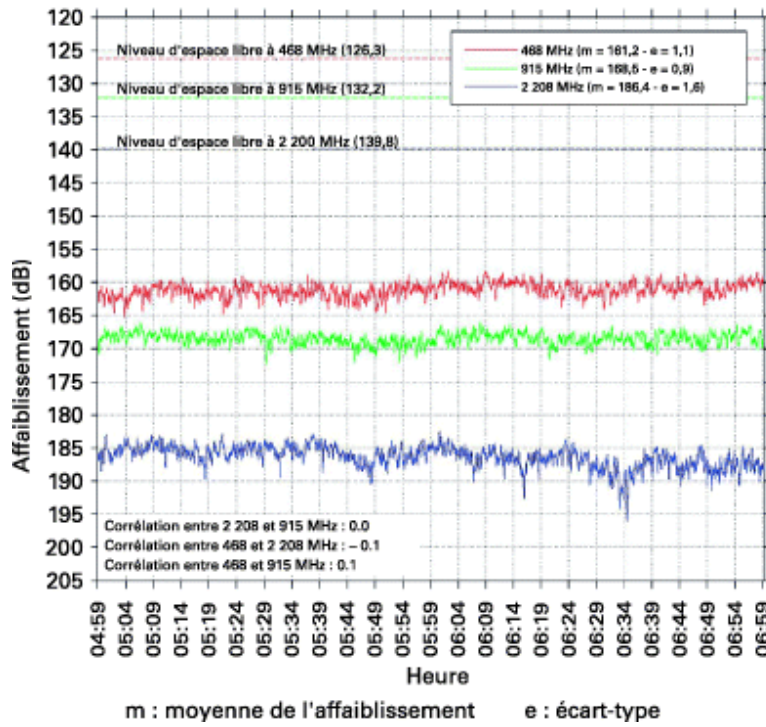


Figure I.12 - Exemple de variation du champ radioélectrique due à la diffusion troposphérique

La présence du terme en λ^4 correspond à une sélectivité en fréquence (la couleur bleue du ciel résulte de la diffusion de la lumière blanche par les molécules d'air).

La section efficace totale de diffusion de toutes les gouttes contenues dans l'unité de volume V est :

$$\sigma_d = \sum_{i=1}^N \frac{N_i \sigma_i}{V} = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right)^2 \sum_{i=1}^N \frac{N_i D_i^6}{V} \quad (\text{I.25})$$

Elle est donc proportionnelle à $\sum_{i=1}^N D_i^6$.

En définissant le facteur de réflectivité radar Z par la relation :

$$Z = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N N_i D_i^6 \quad (\text{I.26})$$

Il en résulte que la section efficace totale de diffusion devient :

$$\sigma_d = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right)^2 Z \quad (\text{I.27})$$

Le facteur de réflectivité radar Z est lié à l'intensité de pluie R par une relation de la forme (Sauvageot, 1992) :

$$Z = aR^b \quad (\text{I.28})$$

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

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

Le rapport $\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\right)^2$, dans le cas de la pluie, est presque indépendant de la fréquence bien que les parties réelle et imaginaire de ε varient fortement pour les fréquences supérieures à 10 GHz. Entre les fréquences basses et environ 100 GHz, on le prendra égal à environ 0,93. Par contre pour la glace cette quantité ne dépasse pas 0,2.

La puissance reçue par diffusion sur un volume de pluie V situé respectivement aux distances d_t et d_r des antennes d'émission et de réception, et en dehors du trajet direct, est :

$$P_r = G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{\sigma_d V}{d_t^2 d_r^2} \quad (\text{I.29})$$

I.2.3.4 Réflexion sur les couches élevées

La réflexion sur les couches élevées de l'atmosphère intervient en tant que répéteur du signal. Ces couches ne sont pas nécessairement présentes sur la totalité de la liaison et le signal reçu dépend de l'angle d'incidence sur celles-ci et de leur état de surface. Une faible variation de ces couches tant en état de surface qu'en position (altitude, inclinaison, etc.) peut conduire à de fortes variations du niveau du signal reçu.

La figure I.13 donne un exemple de variation du signal reçu observée sur une liaison de 105 km sur la plaine d'Alsace à 468, 915 et 2 208 MHz en présence du phénomène de réflexion sur les couches de l'atmosphère.

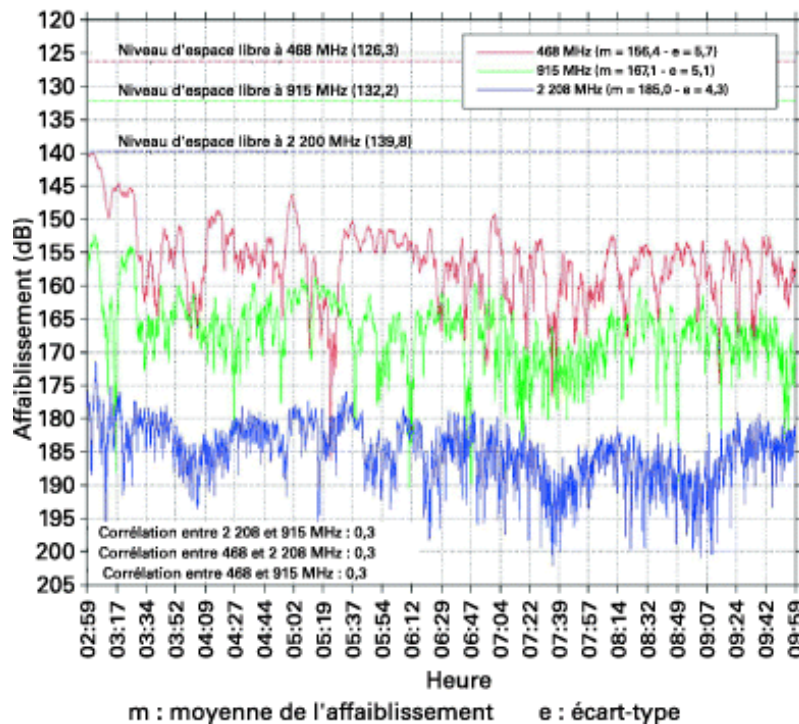


Figure I.13 - Exemple de variation du champ radioélectrique due à la réflexion sur les couches atmosphériques

I.2.3.5 Propagation par conduit

Lorsque le gradient de l'indice de réfraction est inférieur à -157 N/km , les trajectoires des rayons sont plus courbées que la surface terrestre.

La zone de l'atmosphère dans laquelle existent ces conditions de super-réfraction est appelée couche de guidage.

Ces couches ont des effets importants sur les trajets en visibilité directe et les liaisons trans-horizons. En effet en présence d'un conduit, la notion d'horizon radioélectrique n'a plus de sens précis car des points situés au-delà de l'horizon peuvent être atteints. De plus le niveau du signal reçu lors d'un tel phénomène peut atteindre voire même dépasser le niveau en espace libre. Les couches de guidage sont donc une des principales causes de brouillage entre services utilisant la même gamme de fréquence.

Si la couche de guidage est située assez bas et que le sol est suffisamment réfléchissant, on aura un conduit au sol. Par contre si la couche est située en hauteur, les trajectoires des rayons sont courbées successivement vers la Terre et vers l'espace. Le rayon est donc piégé entre deux altitudes et s'il ne touche pas le sol on parle de conduit en altitude ou conduit élevé.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

Les couches de guidage font que les rayons issus d'une antenne émettrice peuvent se croiser en certains points de l'espace. Ainsi apparaissent des zones d'interférence où se croisent les rayons issus des trajets multiples et des zones où ne passe quasiment aucun rayon (le niveau du signal est faible) qu'on appelle « trous radioélectriques ». La frontière entre ces deux zones constitue une caustique le long de laquelle le niveau est très élevé. Comme les conditions de réfraction varient dans le temps, un point de l'espace peut se trouver alternativement dans l'une ou l'autre de ces régions. Il en résulte de brusques fluctuations au niveau du signal reçu.

L'épaisseur d'un conduit dépasse rarement quelques centaines de mètres, mais par contre un conduit peut s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres surtout au-dessus des zones côtières ou des zones très humides. À la surface de la mer peut exister un conduit d'évaporation dont l'épaisseur est de l'ordre d'une dizaine de mètres, mais qui est présent pour un fort pourcentage de temps.

La figure I.14 donne un exemple de variation du signal reçu observée sur une liaison de 105 km sur la plaine d'Alsace à 468, 915 et 2 208 MHz en présence de conduit atmosphérique.

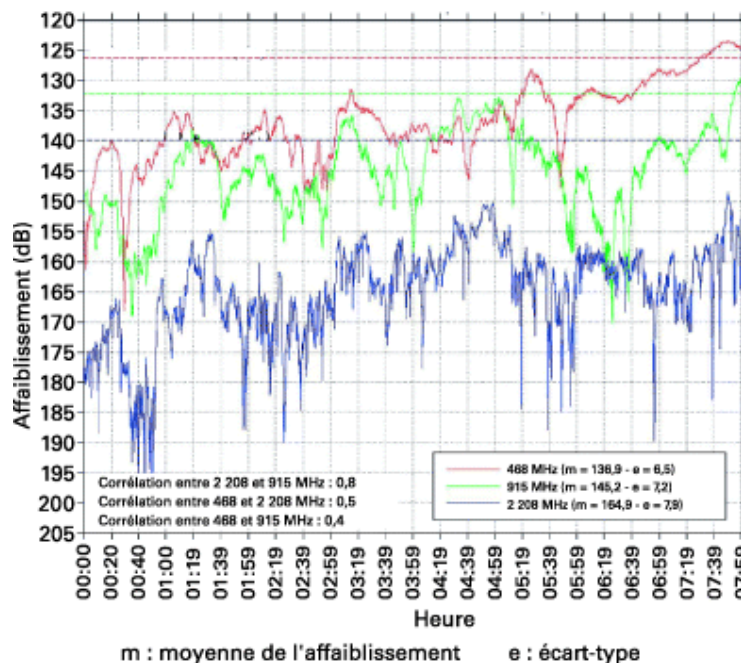


Figure I.14 - Exemple de variation du champ radioélectrique due à la présence de conduit.

I.3 Présentation du logiciel Radio Mobile

C'est un outil destiné à la simplification de la conception des réseaux de communication sans fils. Il peut être utilisé pour la prédiction de la performance des liens radio d'un réseau avant toute phase d'implémentation.

I.3.1 Performances du logiciel Radio Mobile

Ce logiciel prend en compte plusieurs facteurs nécessaires pour l'établissement d'un lien radio, les différentes performances prises en compte par ce logiciel sont :

- la puissance d'émission donnée par :

$$T(dBm) = 10 \log(T_x) + 30$$

Où T_x est la puissance d'émission donnée en Watts.

- Les pertes de la ligne :

$$L1(dB) = \text{pertes de la ligne } T_x$$

- Le gain de l'antenne d'émission :

$$A1(dBi) = \text{Gain de l'antenne } T_x \text{ par rapport à une antenne isotropique}$$

- Les pertes en espace libre :

$P(dB)$ = Perte de la propagation selon le modèle Longley-Rice (incluant la marge d'évanouissement requise).

- Le gain de l'antenne de réception :

$$A2(dBi) = \text{Gain de l'antenne } R_x \text{ par rapport à une antenne isotropique}$$

- Les pertes des câbles d'antenne lors de la réception :

$$L2(dB) = \text{pertes de la ligne } R_x$$

- La sensibilité du récepteur :

$$R(dBm) = 10 \log(\text{seuil de réception en microvolts}) - 107$$

I.3.2 Les données d'entrée

Le logiciel Radio Mobile travaille avec le MNT (Modèle Numérique de Terrain) ou SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) qui fait référence à des fichiers matriciels et vectoriels topographique fournis par deux agences américaines : la NASA et la NGA (ex-NIMA). Ces données altimétriques ont été recueillies au cours d'une mission de onze jours en février 2000 par la navette spatiale Endeavour (STS-99) à une altitude de 233 Km en utilisant l'interférométrie Radar.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

I.3.3 Caractéristiques des données SRTM

Ces images couvrent près de 80% des terres émergées s'étendant de 56° de latitude Sud à 60° de latitude Nord. D'autres données sont également mises à la disposition du public : les données Radar brutes et des données générées à partir des MNT.

On distingue trois types de MNT :

- SRTM1 : Résolution d'une seconde d'arc (31m à l'équateur), ce type de MNT couvre uniquement les USA et ses dépendances.
- SRTM3 : Résolution de trois secondes d'arc (93m à l'équateur) ce type de MNT a une couverture mondiale.
- SRTM30 : Résolution de trente secondes d'arc (926m à l'équateur) ce type de MNT a une couverture mondiale il représente une sorte de mise à jour du format GTOPO30.

La disponibilité de ce type de fichier au grand public est récente et date de l'année 2003.

Nous utiliserons le type SRTM3.

- Le seul format de couverture mondiale précédemment disponible avait une couverture de 1 Km (les GTOPO30).
- Dans les pays qui disposaient déjà de cette résolution, elles étaient le plus souvent payantes et inaccessible au grand public, comme en France où le coût minimal d'une commande à l'IGN était de 400 Euros (selon le catalogue de l'IGN 2003). Exception notable : les Etats Unies ou les DEM 1 degré et 7.5 minutes de l'USGS étaient déjà disponibles dans une résolution au moins équivalente.
- Dans beaucoup de régions du monde et notamment dans les zones tropicales, les données n'existaient pas du tout ou bien elles étaient disponibles uniquement sous forme de carte papier.

I.3.4 Format des fichiers

Les MNT sont des images matricielles binaires d'entiers codés sur 16 bits. Ils peuvent avoir l'extension (.hgt pour les SRTM1 et 3) ou (.dem pour les SRTM30). Les SWBD (Srtm Water Body Data) sont constitués d'un ensemble de trois fichiers avec informations topographiques : fichier principal aux données vectorielles

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

extension (.shp qui sera lu directement par le logiciel SIG) comportant des points, des lignes et des polygones ; fichiers d'extension (.shx) ; table dBASE extension (.dbf).

Chaque MNT (SRTM1 et 3) et fichier SWDB couvre une zone d'un degré d'arc de coté utilisant une projection Transverse Universelle de Mercator (UTM) suivant le système géodésique World Geodesic System 84 (WGS84). Pour les MNT, chaque ligne contenant un nombre égal de points (3601x3601 points pour les SRTM1 et 1201x1201 points pour les SRTM3), leur ouverture dans le logiciel SIG se présentera sous la forme d'une carte rectangulaire aux proportions déformées et c'est le logiciel qui se chargera par des opérations mathématiques de lui rendre une projection UTM conforme aux méridiens convergents. Quant aux SRTM30, ils suivent le découpage des GTOPO30.

I.3.5 Simulation d'une liaison radio

La simulation d'une liaison permet d'identifier et d'évaluer tous les éléments de gain ou de perte de puissance et de savoir prédire si un lien radio était possible ou non.

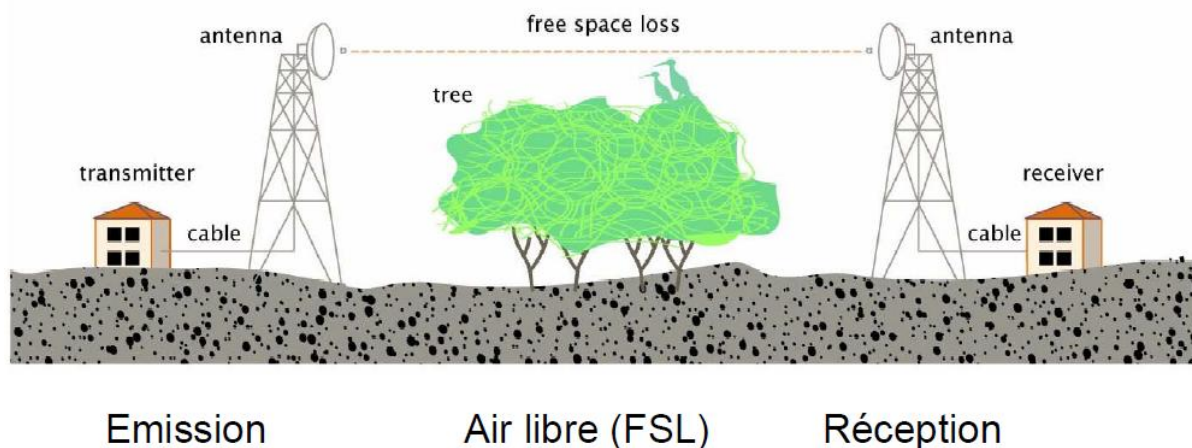


Figure I.15 Exemple d'une liaison radio

Dans cette partie nous allons faire une démonstration avec le logiciel Radio Mobile d'un lien radio.

Tout d'abord, nous allons commencer par l'illustration d'un lien direct sans obstacle et définir les éléments de calcul du logiciel, la capture d'écran suivante est un exemple :

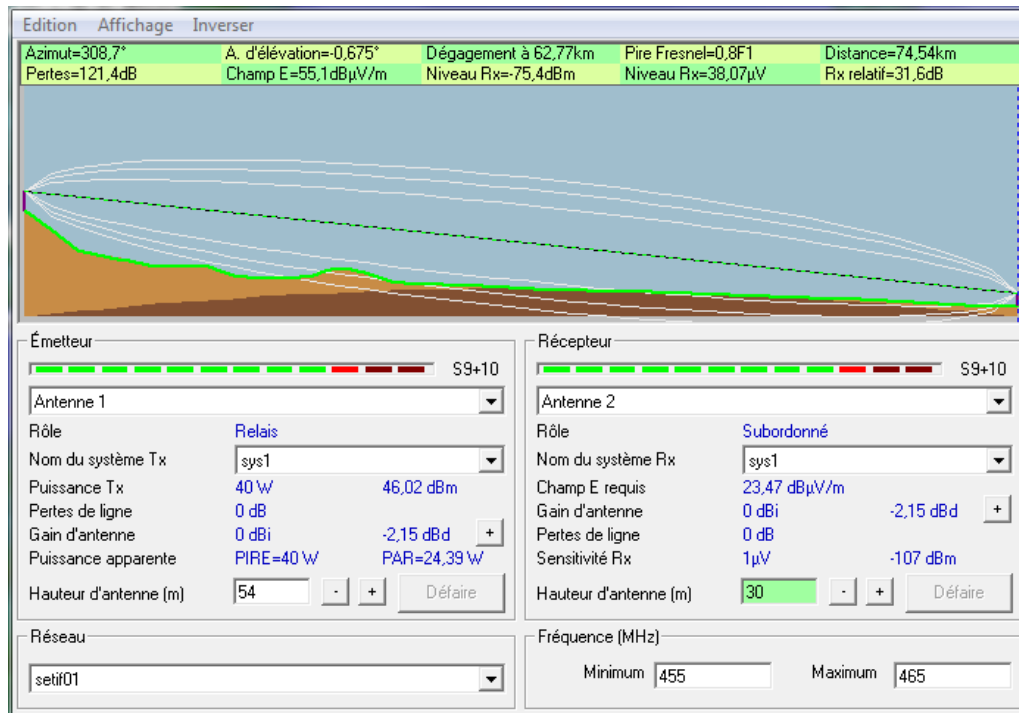


Figure I.16 Lien radio sans obstacle

Puissance T_x : C'est la puissance d'émission de l'antenne 1.

Pertes de ligne : Ce sont les pertes dues au câblage menant de la station de base à l'antenne d'émission.

Gain d'antenne : Des deux antennes d'émission et de réception, s'exprime en dBi (par rapport à l'antenne isotrope) ou en dBd (par rapport à l'antenne dipôle).

Puissance PIRE : C'est la puissance isotrope rayonnée équivalente. Elle est définie dans la direction de l'antenne où la puissance émise est maximale. Elle correspond à la puissance qu'il faudrait appliquer à une antenne isotrope pour obtenir le même champ dans cette direction, pour une installation incluant le câble de liaison.

$PIRE [dBm] = \text{puissance de transmission} [dBm] - \text{pertes dans les câbles et connecteurs} [dB] + \text{gain de l'antenne} [dBi]$.

Puissance PAR : C'est la puissance apparente rayonnée ; c'est une mesure théorique standardisée d'énergie des ondes électromagnétiques émise par une antenne. Elle résulte de la différence entre les gains et les pertes d'un système de transmission. La PAR prend en compte la puissance de sortie de l'émetteur et les pertes dues aux lignes, connecteurs, le gain et la directivité de l'antenne et la différence de niveau du terrain.

Chapitre I Propagation des ondes électromagnétiques

La sensibilité R_x : C'est la sensibilité du récepteur et représente la tension minimale détectée par le récepteur. Elle est exprimée en μV ou en dBm. Cette mesure est capitale pour prédire l'établissement d'une liaison ou pas.

Le champ E requis : c'est le champ minimum nécessaire à la réception du signal, il est calculé à partir de la sensibilité du récepteur.

Dans cet exemple, la liaison est sans obstacles, ni contrainte. Par la suite, nous allons donner un exemple plus compliqué pour illustrer le besoin d'utiliser un logiciel spécialisé pour prédéfinir la liaison entre deux stations.

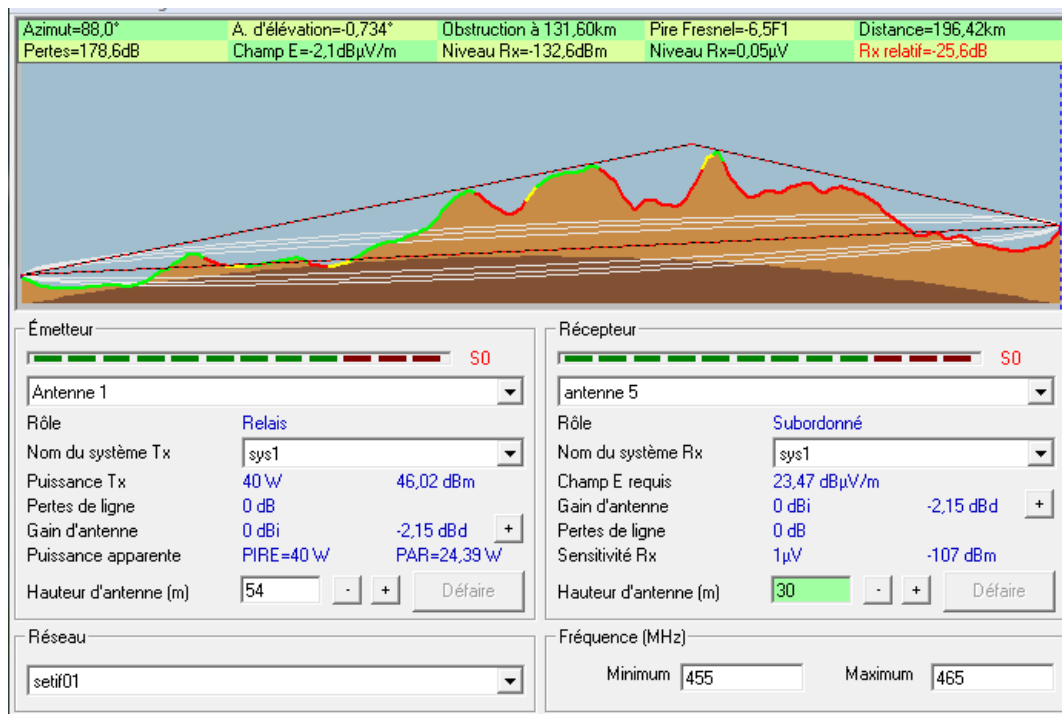


Figure I.17 Lien radio avec obstacle

Pour ce cas, on remarque qu'une liaison directe est impossible à cause des obstacles (montagnes) entre l'émetteur et le récepteur. De même, la liaison indirecte (par diffraction) ne peut se faire à cause du niveau de Rx, égal à $0.01 \mu V$ qui est plus faible que la sensibilité du récepteur qui est égale à $0.1 \mu V$. Donc dans ces conditions et sous ces contraintes, la liaison est impossible à moins d'augmenter davantage la puissance d'émission ou d'avoir un récepteur plus sensible.

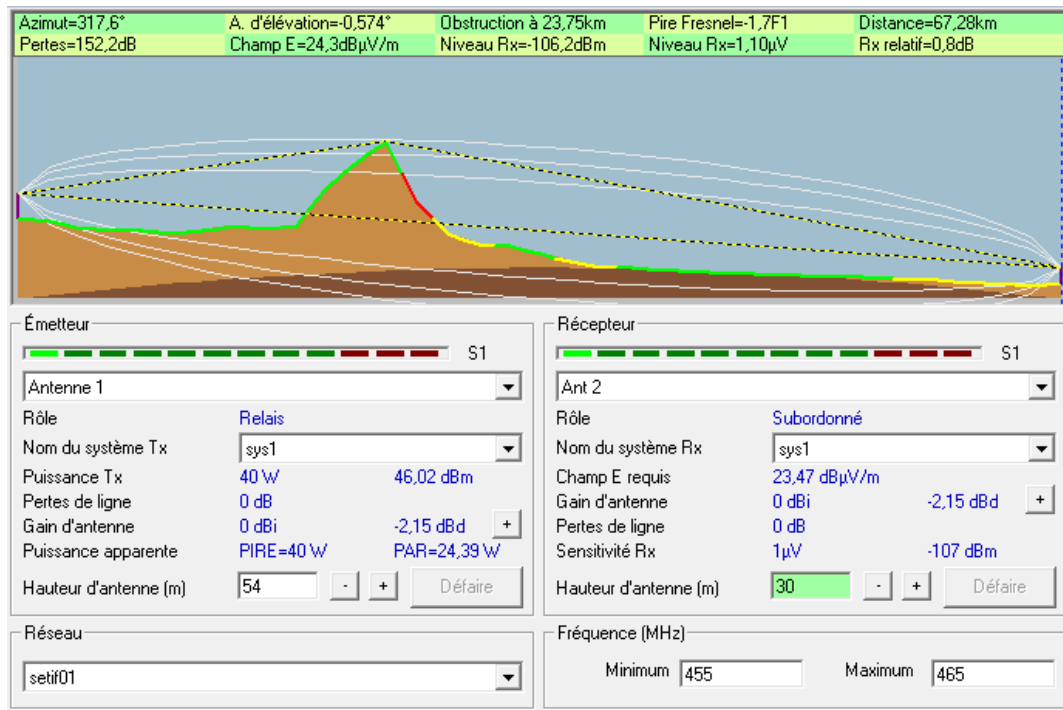


Figure I.18 Lien radio par diffraction

Ce dernier exemple est le plus significatif, car il est le plus proche des liaisons UHF réel. Comme pour l'exemple précédent, on remarque qu'une liaison directe est impossible à moins de rehausser l'antenne avec un pylône. Cependant, une fois que la hauteur du pylône dépasse les 70 m cette solution n'est plus pratique.

On remarque aussi qu'une liaison indirecte par diffraction est possible, car le niveau de Rx est de 0.11 μV, supérieur à la sensibilité de récepteur qui est 0.1 μV.

Les lignes blanches représentent l'ellipsoïde de Fresnel, nécessaire dans le calcul pour éviter les problèmes d'évanouissement du signal émis par interférence.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pris en compte différentes façons de propagation des ondes radioélectriques.

Les simulations exécutées à partir du logiciel nous ont permis d'illustrer les avantages de la diffraction pour la réception des signaux au-delà de l'horizon.

Chapitre II Caractérisation de la région Sétifienne

Chapitre II Caractérisation de la région de Sétif

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques de l'une des trois régions d'étude à savoir la région sétifienne. Nous allons passer en revue le relief et le climat qui caractérisent cette région. En outre, nous allons analyser la composition du sol pour cerner les phénomènes de propagation qui peuvent se manifester.

II.2.1 Topographie de la région de Setif

La wilaya de Sétif a une superficie de 6504 Km², soit 0,27 % du territoire national. Elle se situe entre Alger à l'Ouest (300 Km), Constantine à l'Est (120Km), Bejaia (110 Km) et Jijel (le littoral) au Nord et M'sila au Sud.

La wilaya de Sétif est appelée capitale des hauts plateaux et culmine à une altitude de 1300 m. On peut la décomposer de 3 grandes zones :

II.2.1.1 Une zone montagneuse au Nord

Représentée par la chaîne des Babors qui s'étend sur une centaine de kilomètres couvrant pratiquement tout le Nord de la wilaya soit près de 41% du territoire, où on rencontre des cimes élevées atteignant parfois une altitude de 2004 m (voir figure II.1 et II.2).

- Babors 2.004 m (Commune de Babor)
- Sidi Mimoune 1.646 m (Beni Aziz)
- Tilioune 1.698 m (Ait Tizi)

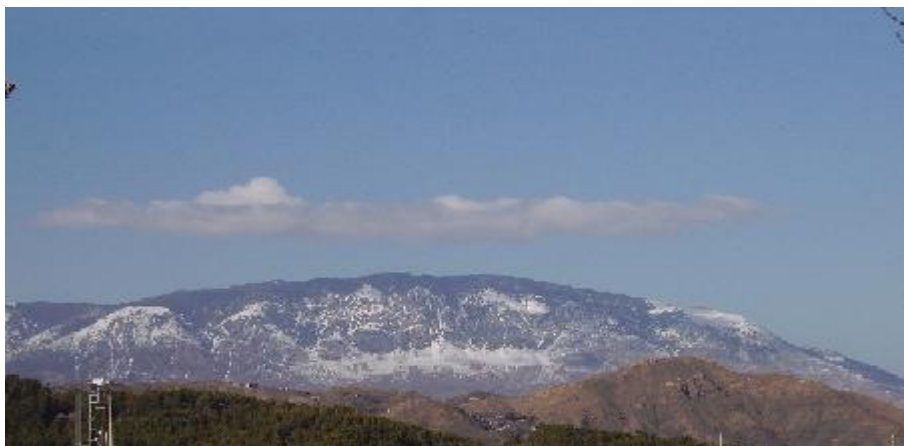


Figure II.1 Photos de la chaîne montagneuse des Babors 2004 m
(Commune de Babor qui se situe au nord de Megress à environ 25Km)



Figure II.2 Photo de Sidi Mimoune 1.646 m
(Beni Aziz qui se trouve au Nord Est de Megress à une distance de 30 Km)

II.2.1.2 Une zone des hautes plaines

Elle occupe la région centrale et couvre près de 23% du territoire de la wilaya, son l'altitude varie entre 800 et 1.300 mètres (voir fig. II.3). Au niveau de cette zone émerge des mamelons et quelques bourrelets montagneux

- Au Nord: Djebel Megress 1.737 M (Ain Abessa)
- A l'Est Djebel Braou 1.263 M (Bazer Sekra)
- Au Sud Djebel Boutaleb Aferhane: 1.886 M (Boutaleb)
- Au Centre Djebel Youcef Aferhane: 1.442 M (Guedjal, Bir Hadada).



Figure II.3 Hautes plaines de la région Sétifienne

Chapitre II Caractérisation de la région de Sétif

II.2.1.3 Une lisière au Sud

Elle s'étend sur 36% du territoire de la wilaya avec un relief partagé entre des zones plates accidentées et les monts du Hodna et de Boutaleb. Cette dernière renferme des cuvettes où dorment les chotts :

- Chott El Beida près de Hammam Sokhna
- Chott El Frein près de Ain Lahdjar
- Chott El Melloul près de Guellal (voir fig. II.4).



Figure II.4 Chott El Melloul près de Guellal

(Ain Oulemene se situe au sud de la région à une distance qui avoisine le 32Km de Megress).

II.2.2 Climat

La wilaya de Sétif est caractérisée par un climat continental semi aride avec des hivers froids (minima - 8°C) et des étés chauds (maxima 40°C). Le cumul de précipitations diffère entre le nord et le sud de la région. On enregistre un cumul annuel de

- Zone Nord: 700 mm
- Zone des hautes plaines: 400 mm
- Zone Sud: 200 mm

II.3 Caractérisation du sol

La wilaya de Sétif s'étend sur trois ensembles naturels: l'Atlas tellien au nord, les hautes plaines au centre et les monts du Hodna au sud. L'altitude oscille entre 800 et 1300 m. la figure II.5 est une vue aérienne de la région

Chapitre II Caractérisation de la région de Sétif



Figure II.5 Image satellite de la région de Sétif 60x60 km²

La figure II.6 nous donne une représentation de l'occupation du sol de la région de Sétif.

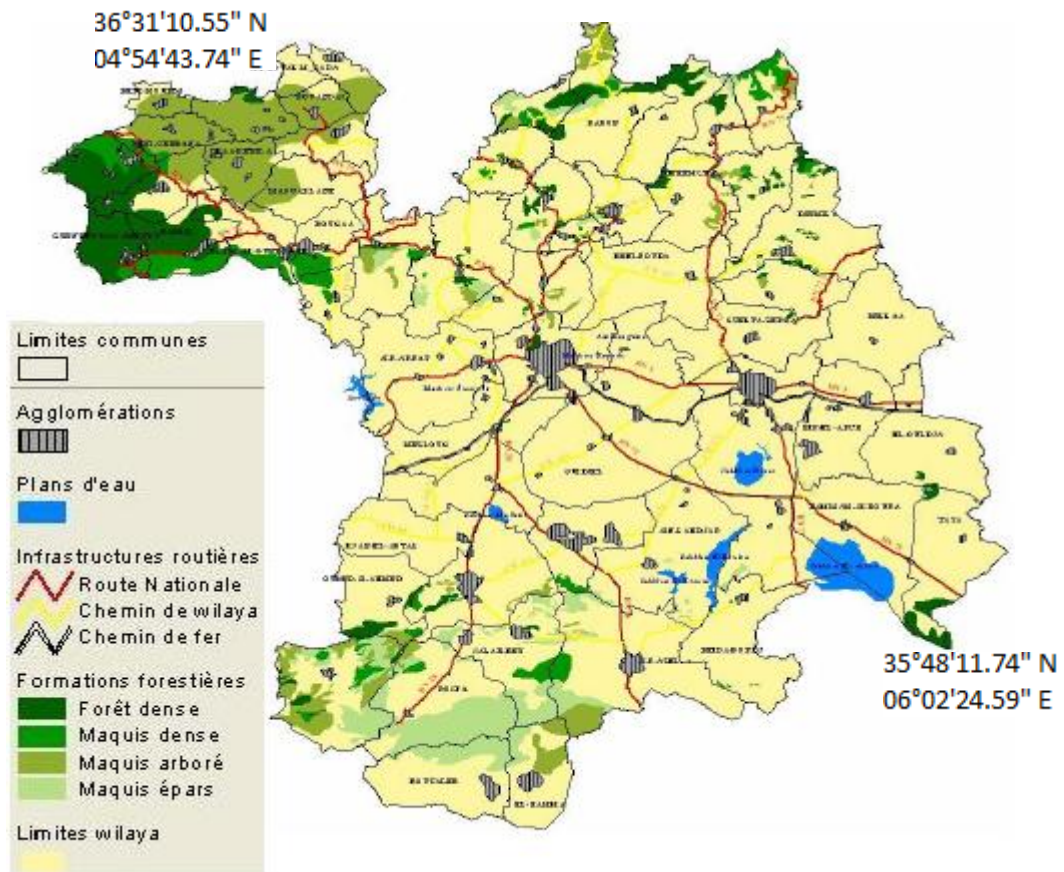


Figure II.6 Occupation du sol

II.3.1 Analyse de la structure du sol

Les sols de la région de Sétif sont généralement de type brun calcaire au sud et au centre avec parfois des encroûtements calcaires (dalles), pour devenir argileux à argileux limoneux et profond au nord. D'une manière générale le substratum est essentiellement calcaire. Les sols sont dans la plupart des cas carbonatés avec souvent des individualisations calcaires continues et dures. Les sulfates mais surtout les chlorures apparaissent plus au sud, dans les sols situés dans les sebkhas et chotts.

Nous nous sommes intéressés à la structure du sol des deux régions Djebel Megriss et Aïn Arnat.

II.3.1.1 Site de Megriss

La figure II.7 représente la carte géologique du site de Djebel Megriss

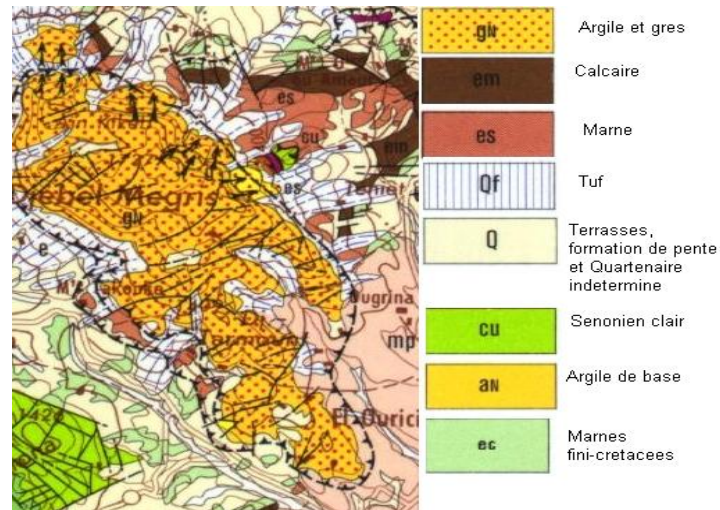


Figure II.7. Carte géologique Djebel Megriss (20Km x 20Km)

Le site de Djebel Megriss est composé en majorité d'argile, qui provoque l'augmentation de la conductivité.

II.3.1.2 Site de Ain Arnat

La figure II.8 donne la carte géologique du site de Ain Arnat.

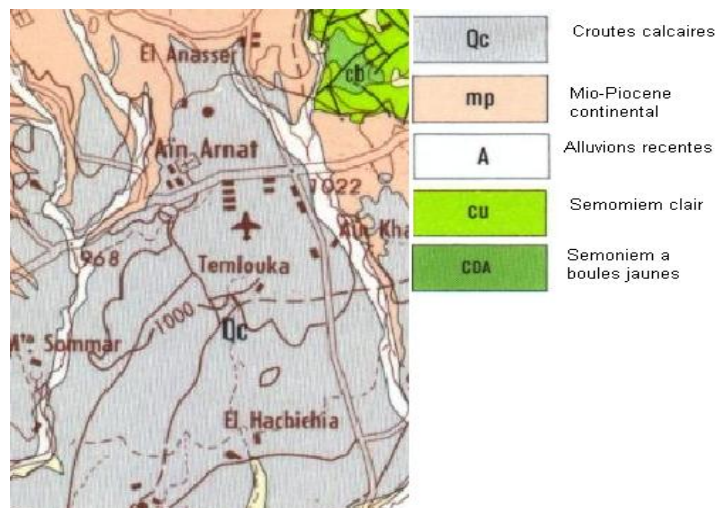


Figure II.8. Carte géologique de Ain Arnat (20Km x 20Km)

Le site de Ain Arnat est composé compte à lui de croûtes de calcaire, qui est caractérisé par une grande résistivité.

Le tableau II.1 donne la résistivité de quelques matériaux.

Chapitre II Caractérisation de la région de Sétif

Matériaux	Résistivité (ohm-mètre)
Acier	$10^{-8} - 10^{-7}$
Air	10 000 - ∞
Argiles massives	5-20
Asphalte	2 000 - 10 000
Béton	10 - 2 000
Bois	450 – 1 170
Calcaire non argileux	1000-5000
Eau de mer	0,2 – 10
Eau douce	10 – 300
Fer	$104 \cdot 10^{-9}$
Granite non altéré	3000-10000
Marnes	20-80
Verre	10^{17}

Tableau II.1 Valeurs de la résistivité de quelques roches et matériaux

Les ondes électromagnétiques sont donc plus absorbées au contact du sol de Ain Arnat que de celui de Djebel Megriss. Ceci justifie encore pourquoi on enregistre moins d'échos parasites à l'aéroport qu'au niveau de Djebel Megriss.

II.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de caractériser l'une des trois régions d'étude. Aussi, une étude des paramètres électriques a montré que le phénomène d'absorption est plus présent dans la région de Ain Arnat qu'au niveau du Djebel Megriss. Ceci pourra éventuellement nous aider dans le choix du site de l'emplacement radar.

Chapitre III Radar météorologique

Chapitre III Radar météorologique

III.1 Introduction

Le mot RADAR est un néologisme provenant de l'acronyme anglais (Radio Dectection And Ranging) qui peut se traduire par détection et estimation de la distance par ondes radios ou radiorepérage.

Le radar à ses débuts servait d'instrument de guerre, puis son utilisation s'est étendue à d'autres domaines comme la navigation, le contrôle du trafic aérien, la radioastronomie et la météorologie. De nos jours, la radar météorologie est devenue une discipline à part entière.

En météorologie il est utilisé pour la détection des précipitations, le calcul de la vitesse de leurs déplacements et la détermination de leurs types (pluie, grêle, neige, etc.).

Un radar est constitué d'une antenne parabolique, d'un système d'émission réception et d'un calculateur. L'antenne est équipée de plusieurs moteurs destinés à l'orienter verticalement et horizontalement et d'un radôme (enveloppe sphérique) qui assure la protection de l'ensemble en cas de vents forts.

III.2 Principe de fonctionnement d'un radar pulsé

Le radar est un système qui utilise des ondes radios pour la détection et la détermination de la distance et vitesse d'objets tels que les avions, les bateaux, ou comme dans notre cas les précipitations.

Le radar émet de puissantes ondes de l'ordre des KW, produites par un oscillateur radio et transmises par l'antenne. Bien que la puissance du signal émis soit très grande, la puissance reçue est le plus souvent très petite.

Les radars les plus utilisés sont :

- Les radars à ondes pulsées ou à impulsion Dans ce cas, le radar émet une impulsion et attend le retour.
- Le radar à émission continue CW (continuous wave). Pour ce type de radar, deux antennes sont prévues, l'une émet continuellement et la seconde reçoit les ondes rétro diffusées

Les radars météorologiques sont en majorité des radars pulsés. Le schéma de la figure (III.1) illustre le principe de fonctionnement du radar à impulsion. L'antenne illumine la cible avec des micro-ondes, qui sont réfléchies puis interceptées grâce au récepteur. Le signal recueilli par l'antenne est appelé écho. Le signal transmis par le radar est généré par un émetteur puissant, l'écho est capté par un récepteur très sensible.

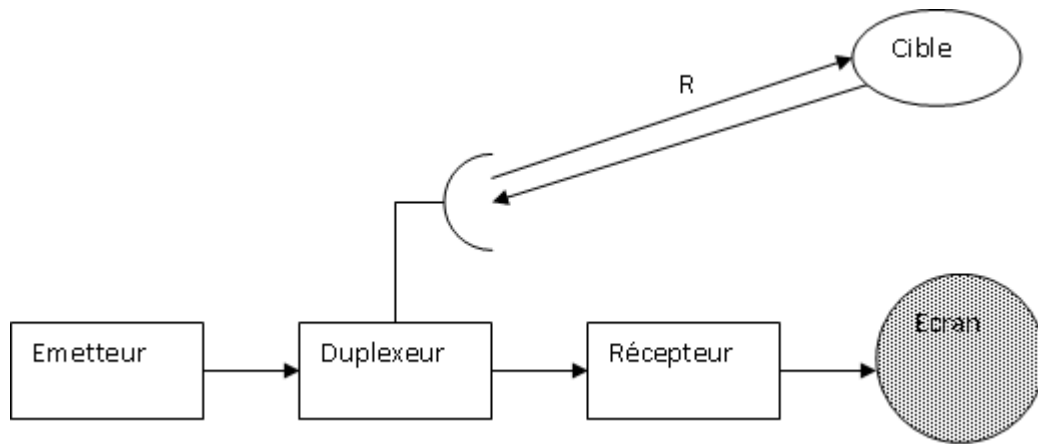


Figure III.1 Schéma bloc d'un radar pulsé

III.3 Caractéristiques du radar

III.3.1 La résolution

La résolution d'un radar est son aptitude à distinguer deux cibles ponctuelles qui sont très proches l'une de l'autre, en azimut ou en distance. On distingue deux types de résolution, la résolution en distance appelée radiale et la résolution angulaire en azimut appelée transversale.

III.3.1.1 Résolution radiale

C'est la capacité du système à distinguer deux ou plusieurs cibles situées dans la même direction mais à des distances différentes. La largeur d'impulsion est le paramètre prépondérant pour la résolution radiale.

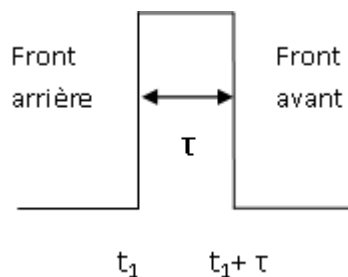


Figure III.2 Impulsion radar

Un système radar doit être capable de distinguer des cibles espacées d'un temps égal à une demi-largeur d'impulsion. En conséquence, la résolution radiale théorique d'un radar vaut [Sauvageot, 1990] :

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

c : Vitesse de la lumière

τ : La durée d'impulsion

III.3.1.2 Résolution transversale

Dans le sens transversal, le radar ne détecte pas les diffuseurs situés en dehors de la zone illuminée par le lobe principal. C'est pourquoi la résolution transversale sera déterminée par l'ouverture du lobe principal à 3 dB

La résolution transversale correspond à la surface illuminée par le lobe principal. Elle est donnée par [Darricau, 1981] :

$$s = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0}{4} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

θ : Ouverture à 3dB en site

ϕ : Ouverture à 3dB en azimut

III.3.2 Volume de résolution d'impulsion

Le volume de résolution (V) d'impulsion radar est exprimé par le produit de la résolution radiale et angulaire. Il représente le volume d'où proviennent les signaux reçus par le radar à un même instant et dont la somme définit l'intensité instantanée du signal [Röttger et Larsen, 1990] :

$$V = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0}{4} \frac{c\tau}{2} \quad (\text{III.3})$$

III.4 Equation du radar pour les cibles météorologiques

La puissance reçue P_r à partir d'un point cible peut être obtenue par plusieurs expressions qui s'appliquent au radar en général. Pour un point cible unique, la forme la plus simple se traduit par l'expression suivante [Doviak et Zrnic, 2006 ; Battan, 1973]:

$$P_r = \frac{\beta \sigma}{r^2} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

β : Constante qui dépend des caractéristiques du radar (puissance émise P_t , gain d'antenne G et longueur d'onde λ).

r : La distance entre le radar et la cible.

Chapitre III Radar météorologique

σ : La section efficace du radar (RCS : Radar Cross Section).

L'expression de σ pour les cibles météorologiques réparties diffère de celles des cibles ponctuelles. L'équation radar est alors différente de celle des cibles ponctuelles. Pour les cibles réparties comme les précipitations, le RCS peut être donné par

$$\sigma = \eta V \quad (\text{III.5})$$

Où :

V : Le volume de résolution de l'impulsion

η : La réflectivité radar exprimée en section transversale par unité de volume.

Elle peut être elle-même exprimée par

$$\eta = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (\text{III.6})$$

Avec :

N : Le nombre de diffuseurs par unité de volume.

σ_i : La section de rétro diffusion de l'i-ème diffuseur.

En général, les diffuseurs météorologiques peuvent prendre plusieurs formes, comme des gouttelettes d'eau, des cristaux de glace, la grêle, la neige ou bien même un mélange de tous.

Mie (1908) a développé une théorie générale en considérant l'énergie rétro diffusée par une onde plane optique rencontrant une sphère conductrice en suspension colloïdale. La même théorie s'applique aux gouttes de pluie sphériques pour laquelle l'énergie rétro diffusée est en fonction de la longueur d'onde (λ), de l'énergie incidente, le rayon (a) et l'indice de réfraction (m) de la particule. Le rapport $\frac{2\pi a}{\lambda}$ détermine la caractéristique de rétro diffusion dominante de la particule. Pour les gouttelettes d'eau sphériques qui sont relativement grandes par rapport à la longueur d'onde de diffusion, les lois de l'optique s'appliquent (diffusion non sélective). Quand les gouttelettes d'eau sont de l'ordre de la longueur d'onde de diffusion, on se trouve dans le domaine de Mie (la région de résonance). Quand elles sont relativement petites par rapport à la longueur d'onde de la diffusion, il s'agit du domaine de Rayleigh.

Quand le rapport $\frac{2\pi a}{\lambda} < 1$, l'approximation de Rayleigh [Battan, 1973] pourrait être appliquée, et σ_i devient :

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6 \quad (\text{III.7})$$

Avec :

Chapitre III Radar météorologique

D_i : Le diamètre de l'i-ème goutte.

Et :

$$|K|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 \quad (\text{III.8})$$

Avec :

m : L'indice de réfraction complexe.

A une température entre 0°C et 20°C et des longueurs d'onde centimétriques, $|K|^2 \approx 0.93$ pour les particules d'eau, et $|K|^2 = 0.197$ pour les particules de glace. On peut maintenant écrire l'équation (III.6) sous la forme :

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^6} |K|^2 \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (\text{III.9})$$

On définit alors le facteur de réflectivité radar par [Battan, 1973] :

$$z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (\text{III.10})$$

En météorologie radar, il est plus intéressant d'exprimer les diamètres D_i des gouttes d'eau en millimètre et on considère la sommation sur 1m^3 . Donc, l'unité de facteur de réflectivité z conventionnelle est en mm^6/m^3 . Cependant, le processus de diffusion du radar pour les différentes formes et températures des particules de glace est extrêmement compliqué et une expression généralisée définitive ne peut être donnée.

Il est souvent pratique de traiter la distribution granulométrique des particules d'eau comme une fonction continue avec une densité volumique $N(D)$, ou $N(D)$ est le nombre de gouttes par unité de volume ayant des diamètres compris entre D et $D + dD$. Dans ce cas, z est donné par le sixième moment de la distribution granulométrique [Battan, 1973] :

$$z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (\text{III.11})$$

Si le faisceau radar est rempli de diffuseurs, le volume élémentaire V est donné approximativement par :

$$V \approx \frac{\pi \theta \phi r^2 c \tau}{8} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

θ et ϕ : Respectivement l'angle d'azimut et d'ouverture du faisceau.

c : La célérité.

τ : Largeur d'impulsion du radar.

Chapitre III Radar météorologique

En remplaçant les deux équations (III.6) et (III.12) dans (III.5), on remarque que le RCS σ pour le diffuseur météorologique est directement proportionnelle au volume d'impulsion comme déterminé par la longueur de l'impulsion et l'ouverture du faisceau vu par la cible. Alors, en combinant les équations (III.5), (III.9) et (III.12) dans l'équation (III.4) on obtient :

$$\begin{aligned}
 P_r &= \frac{\beta}{r^4} \frac{\pi \theta \phi r^2 c \tau \pi^5}{8 \lambda^4} |K|^2 \sum_{i=1}^N D_i^6 \\
 &= \frac{\beta \pi^6 \theta \phi c \tau |K|^2}{8 \lambda^4 r^2} Z \\
 &= \frac{\beta' Z}{r^2}
 \end{aligned} \tag{III.13}$$

Cette expression démontre que pour une cible météorologique distribuée, la puissance reçue est :

- fonction de β' , une constante qui dépend du système radar et des paramètres physiques des nuages.
- directement proportionnelle au facteur de réflectivité Z .
- inversement proportionnelle à r^2 (et non pas r^4 comme pour les cibles ponctuelles).

Les paramètres radar représentés par β de l'équation (III.4), portent sur la puissance de transmission P_t , le gain de l'antenne G et la longueur d'onde λ . On inclut toutes les pertes dans le facteur de gain du système d'antenne (radôme, guide d'onde, rotor, etc.) puisqu'il faut que toutes les mesures soient référencées au même point du système radar (généralement à un coupleur près du rotor). Comme le gain d'antenne n'est pas uniforme sur toute la largeur du faisceau, [Probert-Jones, 1962] a supposé une loi gaussienne pour le faisceau de l'antenne, et a obtenu l'équation suivante pour la puissance reçue :

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta \phi c \tau}{512 (2 \ln 2) \pi^2 r^2} \sum_{i=1}^N \sigma_i \tag{III.14}$$

Où : $(2 \ln 2)$ est la correction de la loi gaussienne du faisceau. En portant les équations (III.6), (III.9) et (III.10) dans (III.14), la puissance reçue pourrait être exprimée en fonction du facteur de réflectivité Z et le rayon r comme suit :

$$P_r = \frac{P_t G^2 \theta \phi c \tau \pi^3 |K|^2 Z}{512 (2 \ln 2) \lambda^2 r^2} \tag{III.15}$$

Le filtre de réception atténue légèrement le signal de réception. Tout se passe comme si P_t est atténuée de L_r . L'expression du facteur de réflectivité s'écrit :

Chapitre III Radar météorologique

$$Z = \left[\frac{1024 \ln 2 \lambda^2 P_r r^2}{G^2 \theta \phi c \tau \pi^3 |K|^2 P_t L_r} \right] \quad (\text{III.16})$$

Il est plus commode d'exprimer Z en mm^6/m^3 dans l'équation (III.16). Puisque les valeurs d'intérêt de Z peuvent s'étendre à plusieurs niveaux de magnitudes, une échelle logarithmique est souvent utilisée. On obtient alors :

$$Z(\text{dBZ}) = C + P_r(\text{Dbm}) + 20 \log r (\text{Km}) \quad (\text{III.17})$$

Où (C) est appelée constante radar météorologique. La valeur typique de (C) varie entre 65 dB et 75 dB pour les radars météorologiques opérationnels. C'est clair que pour un rayon et une puissance de réception fixe, la plus faible valeur de la constante (C) permet à la plus petite réflectivité en dBZ d'être observée. Ainsi, les radars les plus sensibles sont ceux qui ont les plus faibles valeurs de (C).

L'expression (III.17) peut être utilisée pour le calcul du facteur de réflectivité (Z) quand la plus petite particule diffusante vérifie l'approximation de Rayleigh, et quand les diffuseurs sont des particules de glace ou d'eau. Et puisque toutes ces conditions ne sont pas toujours satisfaites, on utilise le facteur de réflectivité effectif Z_e à la place de Z . Quand le facteur Z_e est utilisé, on comprend que les conditions précédentes ont été supposées. Les praticiens dans le domaine du radar météorologique utilisent Z_e et Z de façon interchangeable.

Un autre facteur qu'on a volontairement ignoré dans la mise en place de l'équation radar est l'atténuation par précipitation et les gaz atmosphériques. A une longueur d'onde de 10 cm, l'atténuation est généralement négligée ; cependant, aux longueurs d'ondes de 5cm, 3cm et 2 cm et plus spécialement les longueurs d'ondes millimétriques, l'atténuation atmosphérique doit être prise en considération dans l'équation radar.

Enfin, il est important de noter que la variable Z a une signification purement météorologique car elle est directement liée aux caractéristiques des nuages et aux taux de précipitations actuels. Les valeurs de Z pour les nuages non précipitant inférieures à -40dBZ, sont d'intérêt pour l'étude de la physique des nuages. En temps clair (ciel clair), et dans les basse couches atmosphériques, les valeurs de Z sont de l'ordre de -20dBZ à 20dBZ, et sont généralement dues aux oiseaux et insectes. En temps de pluie, les valeurs de Z peuvent aller de 0dBZ jusqu'à près de 60dBZ. Les averses de grêles produisent un facteur Z supérieur à 70dBZ. Plusieurs types de radars météorologiques sont conçus pour détecter les valeurs de Z qui traduisent les échos de précipitations (0dBZ à 60dBZ) et les échos en temps clair sur 100Km quand la courbure de la terre empêche quelques mesures. Ainsi pouvoir mesurer des

échos de précipitation trop forts à petites distances et aussi des échos de précipitations trop faibles à faibles distances requiert un récepteur radar ayant une échelle s'étalant entre 90-95dBZ, alors que la mesure de faibles échos en présence d'échos du sol exige une échelle supérieure à 60dBZ. Les radars météorologiques les plus récents et la plupart des radars de recherche arrivent à parvenir à de meilleures qualités en matière de sensibilité et peuvent détecter des valeurs inférieures à -40dBZ à petites distances.

Les radars qui étaient opérationnels dans le passé utilisaient une technique de contrôle temporelle de la sensibilité (STC : Sensitivity Time Control) pour réduire le gain et détecter les échos proches dans le cas des petites distances ; cependant, les radars les plus récents ont tendance à ne pas utiliser cette technique depuis la conception de récepteurs dynamiques qui sont adaptés pour couvrir d'importantes intensités d'échos météorologiques aux distances nécessaires. Les radars de recherches ont rarement utilisé la STC à cause des pertes en sensibilité présentes à petites distances.

III.5 Paramètres de conception d'un radar météorologiques

Il existe quatre facteurs incontournables qui affectent la conception d'un radar météorologique :

- L'atténuation.
- L'ambiguïté en distance.
- L'ambiguïté en vitesse.
- Les échos du sol.

III.5.1 Effets de l'atténuation

L'atténuation produit deux effets négatifs sur les signaux radar météorologique.

Premièrement, elle rend difficile les mesures quantitatives précises de l'énergie rétro diffusée des échos de précipitations à des portées lointaines. Cette incapacité de mesurer précisément la vraie valeur de l'énergie rétro diffusée nécessite une correction de l'atténuation de l'énergie reçue lorsque cela est possible.

Deuxièmement, si l'atténuation due aux précipitations est suffisamment grande, le signal d'une cellule de précipitation derrière une région de forte absorption peut être totalement supprimé. Un exemple des conséquences potentiellement graves d'une très forte absorption est l'impacte qu'il pourrait y avoir pour les radars de surveillance des tempêtes de l'avion, la plupart travaillent sur une longueur d'onde de 3 cm. En effet, il est fréquent que pour les petites longueurs d'ondes, les radars n'arrivent pas à détecter des cellules de

convection intenses derrière des orages à haute atténuation. Aussi les tempêtes sévères avec des taux de précipitation élevés causent une grande atténuation même aux longueurs d'ondes de 5 cm.

III.5.2 L'ambiguïté en distance et vitesse

III.5.2.1 L'ambiguïté en distance

L'horloge du radar est remise à zéro à chaque fois qu'une nouvelle impulsion est émise, et ce afin de s'assurer que la mesure de distance s'effectue bien à partir de la dernière impulsion. Les échos reçus dans un délai supérieur à la période de répétition des impulsions T_r génèrent des erreurs de calcul de la distance (échos du nième balayage); on parle alors d'ambiguïté en distance.

Les échos revenant au radar au delà de T_r se traduisent par une ambiguïté en distance (erreur de visualisation) alors que ceux qui reviennent dans un délai inférieur à T_r sont affichés à la distance correcte (non ambiguë). La distance maximum sans ambiguïté pour un radar donné est déterminée par la formule :

$$R_{max}^u = \frac{c T_r}{2} = \frac{c}{2 f_r} \quad (III.18)$$

III.5.2.2 L'ambiguïté en vitesse

L'ambiguïté de la fréquence Doppler exprime la possibilité d'attribuer différentes valeurs de la vitesse radiale V_r à une fréquence donnée Doppler f_d . C'est le résultat du caractère périodique du spectre Doppler dans des radars à impulsions. Le maximum de la fréquence non ambiguë Doppler est :

$$f_d^u = \pm \frac{f_r}{2} \quad (III.19)$$

La vitesse radiale maximale non ambiguë est alors :

$$V_r^u = \pm \frac{\lambda f_r}{4} \quad (III.20)$$

III.5.3 Les échos du sol

Les applications du radar météorologique ont pour but de détecter les échos de précipitations en présence d'échos du sol. Les radars au sol sont d'un grand intérêt pour les domaines de l'agriculture et l'hydraulique ainsi que pour le grand public. Les échos du sol présentent de sérieux problèmes aux radars météorologiques. Les réseaux Nexrad et le

Chapitre III Radar météorologique

TDWR ont été conçus pour assurer la suppression des échos du sol supérieur à 40dB. [Chrisman et Ray, 2005 ; Wieler et Schrader, 1991]

Bien que les échos du sol ne puissent pas être totalement éliminés, leurs effets peuvent être contournés à l'aide de quelques techniques et algorithmes. L'une des approches consiste à utiliser une antenne à faibles lobes secondaires, ce qui supprimera la composante d'échos du sol quand l'onde émise du lobe principal passe légèrement au dessus de l'horizon.

Les radars météorologiques typiques utilisent des techniques de traitement du signal pour implémenter des filtres qui suppriment les faibles échos du sol [Sachidananda et Zrinc, 2000]. Ces filtres travaillent aussi bien dans le domaine temporel que fréquentielle.

III.6 Conclusion

Le radar météorologique est de loin l'instrument le plus utilisé pour l'estimation des précipitations. Cependant les images radars sont composées d'échos de précipitations mais aussi d'échos en provenance de la surface terrestre, qui réduisent considérablement les performances du radar en induisant des erreurs dans l'estimation et l'identification. Ces derniers échos sont considérés comme parasites par les météorologues. D'où l'intérêt d'un choix pour l'emplacement radar.

Chapitre IV Résultats et interprétations

IV.1 Introduction

Les échos en provenance de la surface terrestre induisent des erreurs dans l'estimation des précipitations et l'identification des nuages. Il est indispensable de rechercher le meilleur emplacement radar afin d'éviter ces échos indésirables.

La simulation des cartes des échos du sol, qui perturbent la mesure radar est possible en se basant sur un modèle numérique de terrain (MNT).

Dans cette partie, nous allons simuler les cartes des échos du sol à l'aide du logiciel Radio Mobile de trois sites radar, Sétif (Algérie), Bordeaux (France), et Dakar (Sénégal) à partir de leurs images SRTM.

IV.2 Extraction du MNT à partir du logiciel Radio Mobile

L'extraction du MNT se fait par une simple introduction des coordonnées géographiques de la position radar voir la figure IV.1.

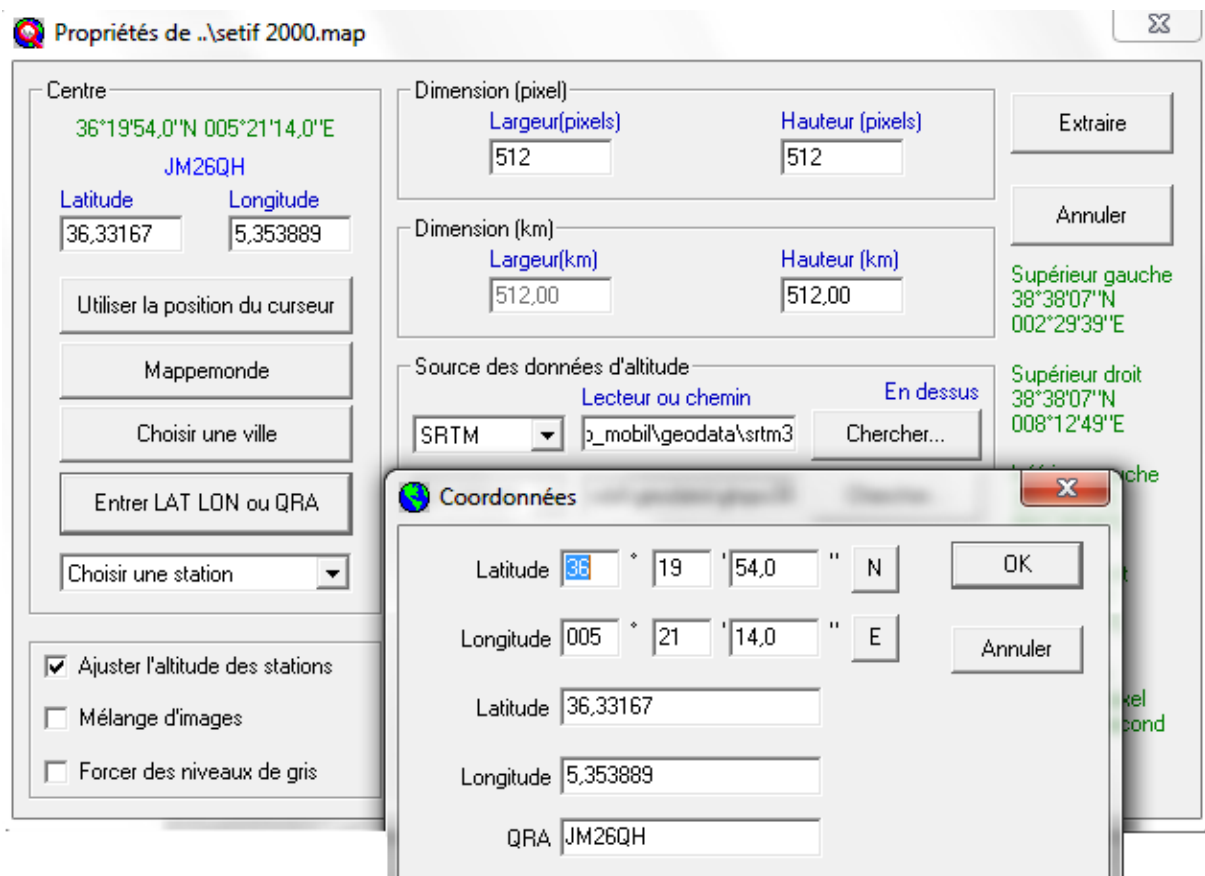


Figure IV.1 Extraction des MNT à partir de Radio Mobile.

Comme la résolution du radar est de 1 Km, nous avons opté pour une résolution de MNT de la même valeur. Nous avons choisi une dimension de l'image égale à celle du radar 512x512 pixel. Le MNT obtenu est représenté dans la figure IV.2

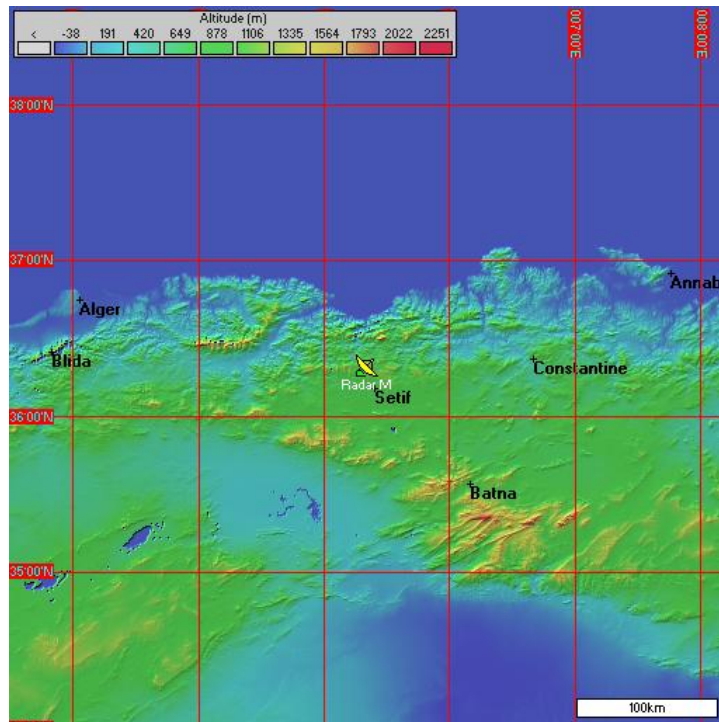


Figure IV.2 MNT autour du radar de Megriss.

IV.3 Caractéristiques techniques du radar de Sétif

Le radar de Sétif est installé près de la ville de Sétif sur la montagne de Megriss à une altitude de 1722 M dont les coordonnées géographiques sont 36°19'54'' N de latitude et 5°21'14'' E de longitude. Le radar de Sétif est l'un des sept radars du réseau météorologique Algérien. Il est associé à une chaîne SANAGA (Système d'Acquisition Numérique pour l'Analyse des Gains Africains) qui est un système d'acquisition et de numérisation des images [Sauvageot et Despau, 1990]. Les caractéristiques techniques du radar sont données dans le tableau suivant :

Type d'antenne	Parabolique
Fréquence d'émission	5,6 GHz
Puissance d'émission	250 KW crête
Gain de l'antenne	30 dB
Sensibilité à la réception	-110 dBm
Résolution spatiale	1 Km x 1 Km
Durée de l'impulsion	2 μ s
Diamètre de l'antenne	3 m
Ouverture du faisceau à 3 dB	1,1°

Tableau IV.1 Caractéristiques techniques du radar de Sétif

IV.4 Présentation de l'image des échos radar de Megriss

Les images radar de Sétif ont été obtenues avec une résolution de 1 Km par pixel dans une représentation en mode PPI (Plan Position Indicator). Elles sont représentées sur 16 couleurs définissant les intensités des puissances reçues par le radar. Le radar couvre la région sur un rayon de 256 Km, ce qui nous donne des images de 512 Km par 512 Km ; chaque pixel de l'image représente 1Km² de surface. La figure IV.3 présente une image de précipitations contaminée par les échos du sol et une image prise en temps clair.

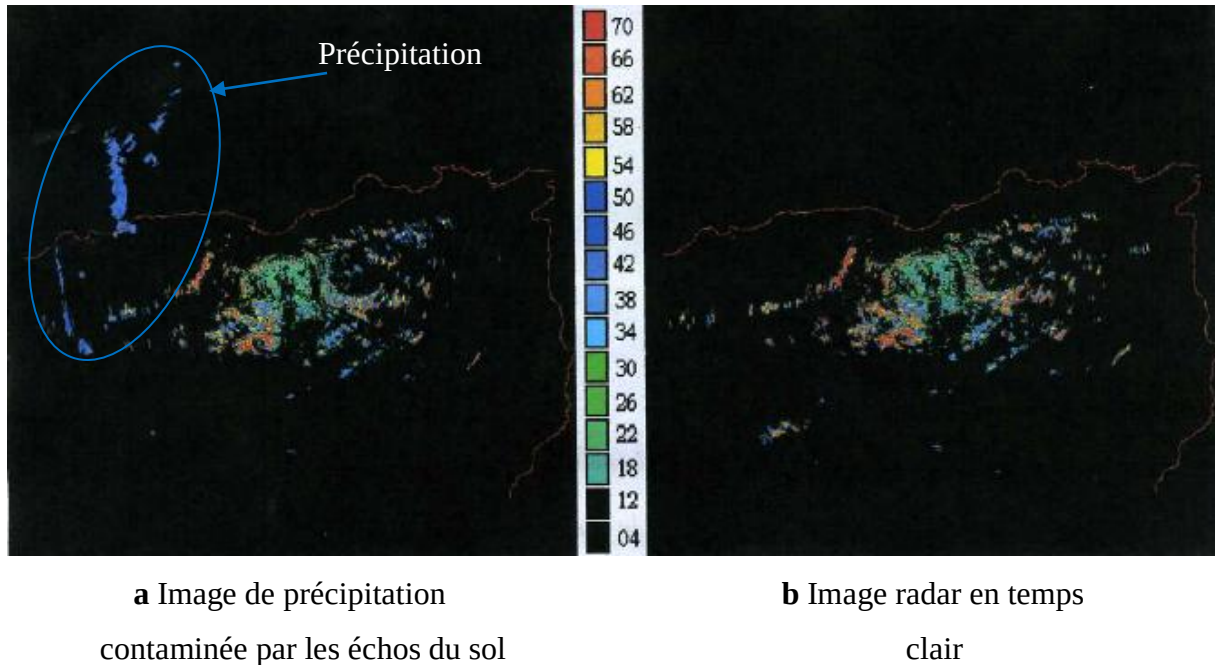


Figure IV.3 Cartographie des échos du sol du site de Sétif

IV.5 Simulation des échos du sol avec le logiciel Radio Mobile

Les échos du sol simulés sont obtenus en considérant la visibilité radar. On suppose que l'atmosphère est homogène, donc on a affaire à une trajectoire des ondes rectilignes. Afin de calculer la couverture visuelle du radar, il suffit de définir l'observateur (ici le radar), la hauteur du capteur (hauteur de l'antenne radar) par rapport au sol et la portée maximale.

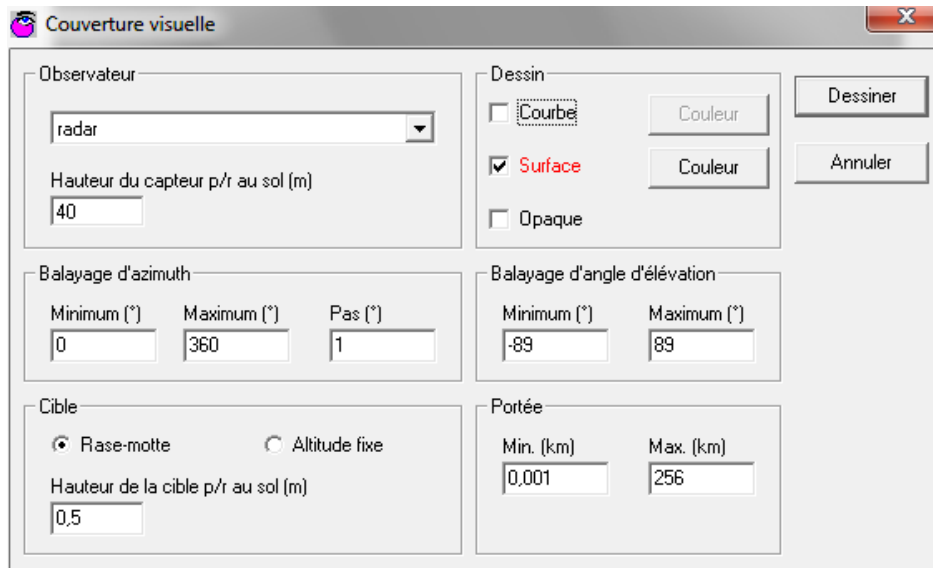


Figure IV.4 Couverture visuelle sur Radio Mobile

La fonction « Dessiner » présentée par la figure IV.4 permet de dessiner les échos du sol représentés sur le MNT figure IV.5 pour les différentes hauteurs de l'antenne radar.

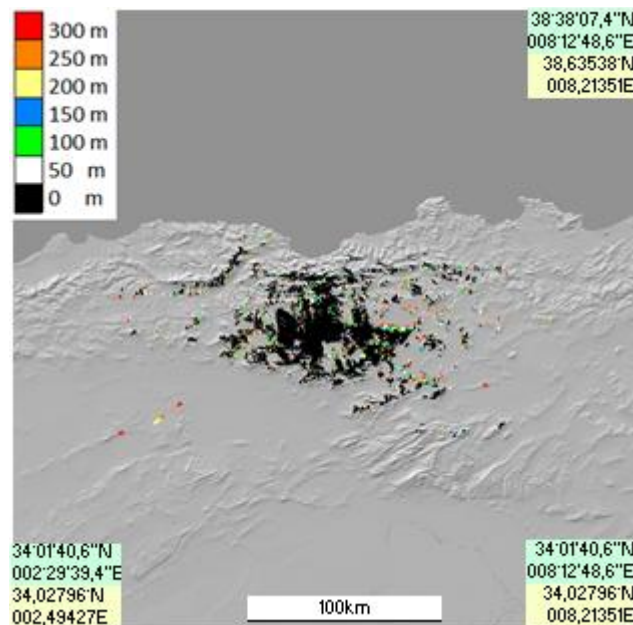


Figure IV.5 Couverture visuelle du radar de Sétif

La figure IV.6 est une superposition de deux images, la première extraite de Google Earth et la seconde obtenue à partir du MNT SRTM. Elle représente l'étendue des obstacles sur une image réelle.

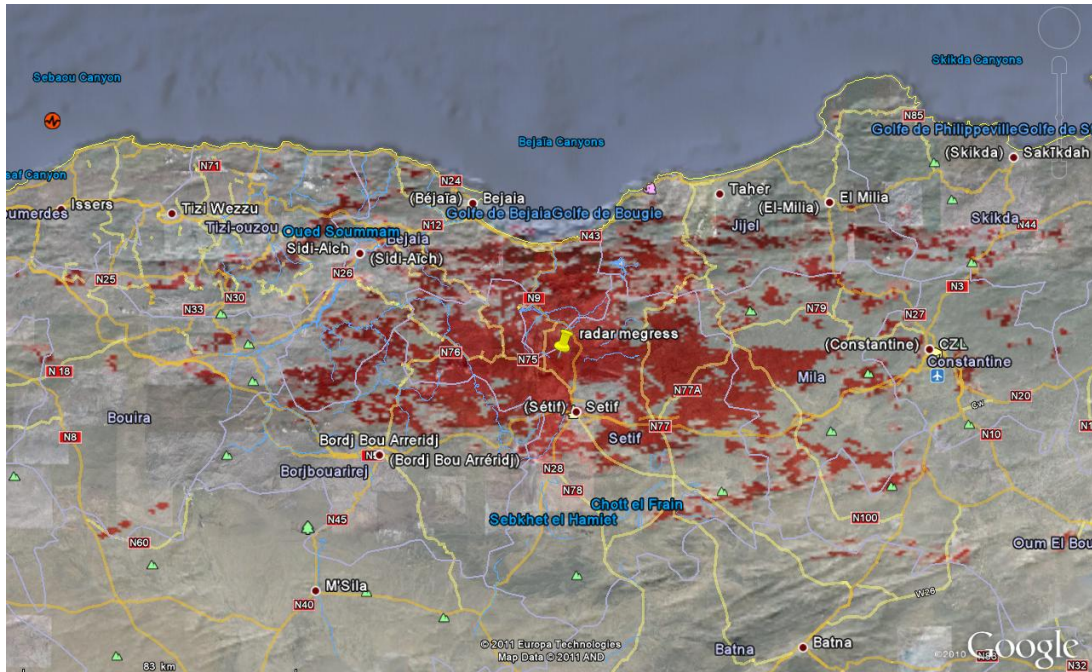


Figure IV.6 Superposition d'image

Pour représenter que les échos du sol sur l'image, les données d'altitudes doivent être éliminées. C'est pour quoi l'image précédente sera traitée sous Matlab pour obtenir l'image de la figure IV.7

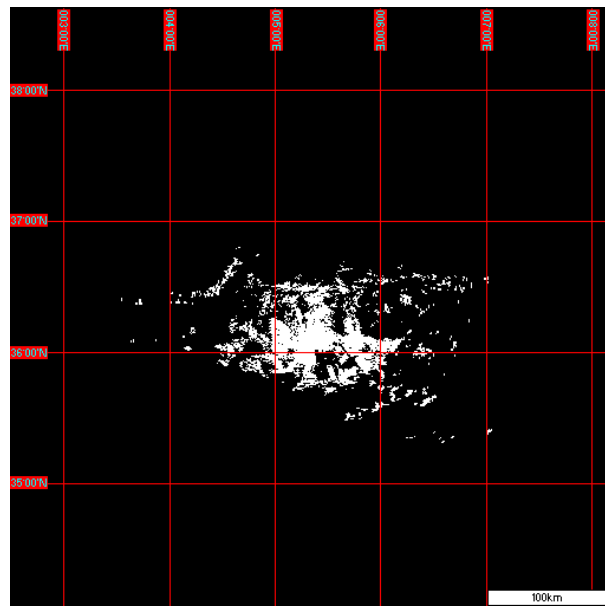


Figure IV.7 Image des échos du sol du radar de Megriss

Le balayage de l'antenne radar de l'antenne donne un maximum d'angle de tir (angle de site) valant $0,3^\circ$ à 25° d'azimut et un minimum de $-1,3^\circ$ (angle de site) à 0° d'azimut voir la figure IV.8.

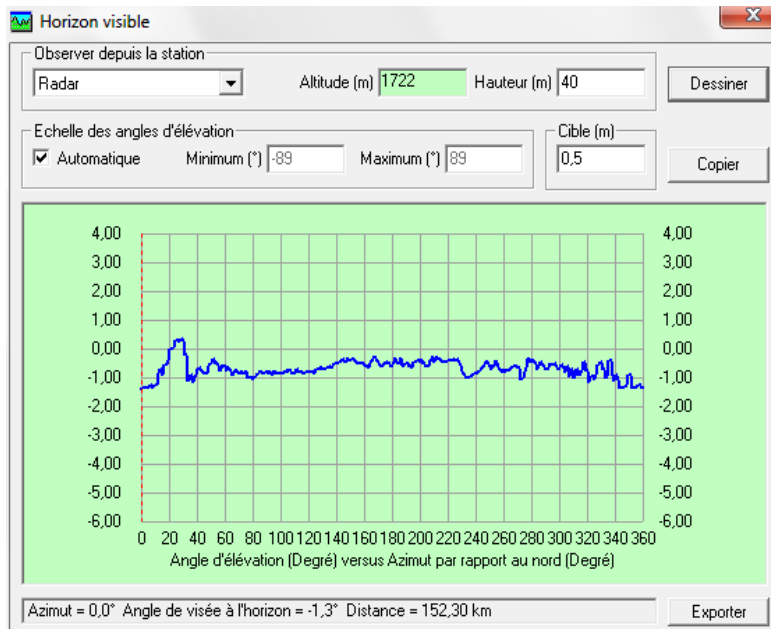
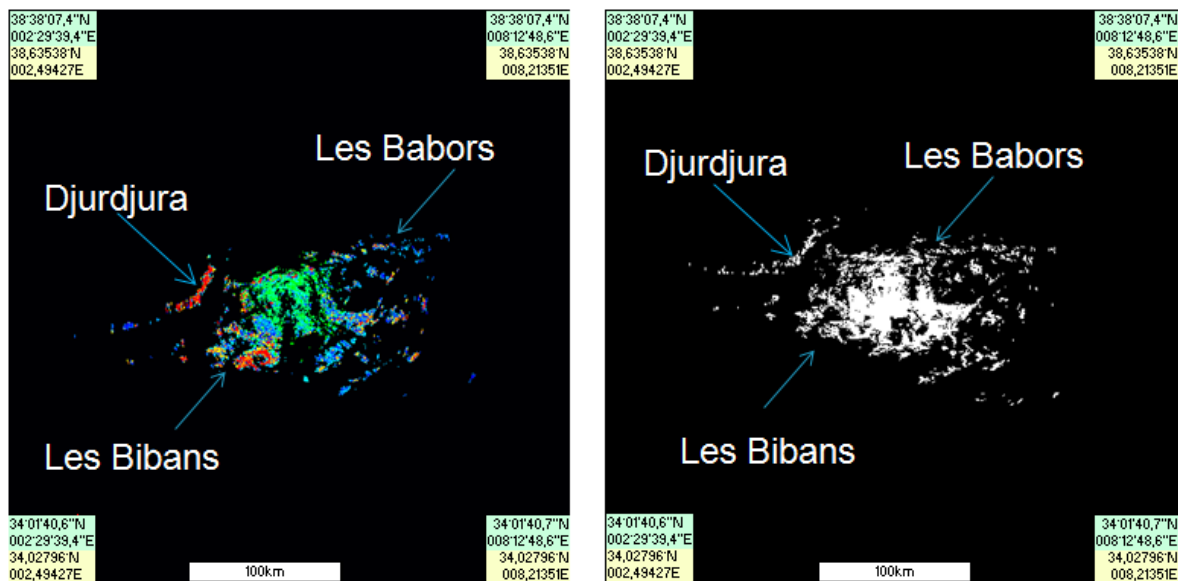


Figure IV.8 Horizon visible par rapport au radar de Megriss

D'après la figure IV.8 on remarque qu'à partir d'un angle de tir de $0,3^\circ$, l'onde ne rencontre aucun obstacle.

IV.6.1 Comparaison entre les échos du sol réels et simulés par le radar de Megriss

La cartographie des échos du sol observés en temps clair par le radar de Megriss et ceux simulés à partir du MNT SRTM sont représentés par la figure IV.8. La lecture des deux cartes montre que les obstacles terrestres tels que les montagnes du Djurdjura, les monts des Babors et des Bibans sont identifiés sur les deux cartes.



a Echos du sol réels

b Echos du sol simulés

Figure IV.9 Cartographie des échos réels et simulés pour le site de Megriss

Chapitre IV Résultats et interprétations

Pour tester les performances de notre approche, nous avons calculé les surfaces occupées par les échos du sol :

- Echos du sol simulés : 6552 pixels.
- Echos du sol réels : 6976 pixels.
- Taux d'erreur relatif = 6. %

Le taux d'erreur obtenu est très acceptable. Soulignons aussi que le changement urbain qui s'est opéré dans la région étudiée depuis l'année 2000 (année de la conception des images SRTM utilisées), serait une des causes de l'écart entre la surface réelle et celle estimée.

IV.6.2 Etude du site de Ain Arnat

Pour démontrer le besoin de faire une étude des échos du sol avant l'installation d'un radar météorologique, nous proposons l'étude d'un autre site, celui de Ain Arnat dont les coordonnées géographiques sont 36°11'1''N de l'attitude et 5°18'38''E de longitude à une altitude de 1016 m. Rappelons que l'aéroport de Ain Arnat se situe à 19 Km du radar de Megriss.

IV.6.2.1 Echos du sol par rapport à la hauteur de l'antenne

L'influence de la hauteur de l'antenne est analysée pour différentes valeurs. Les figures IV.10.a à IV.10.g illustrent les différents cas.

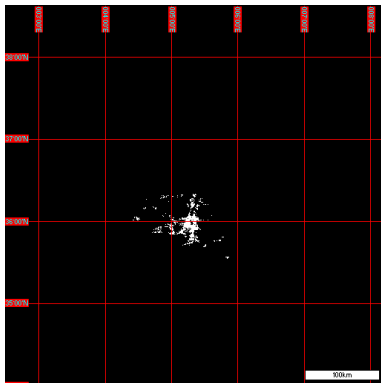


Figure IV.10a

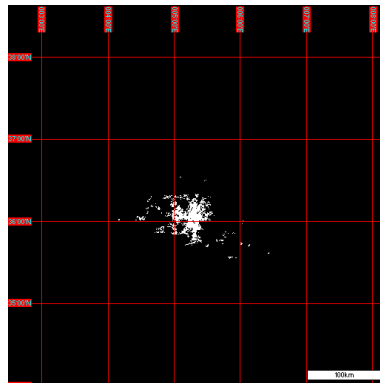


Figure IV.10 b

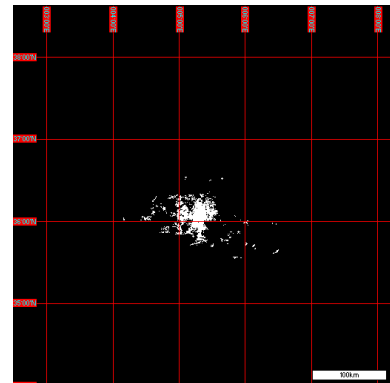


Figure IV.10 c

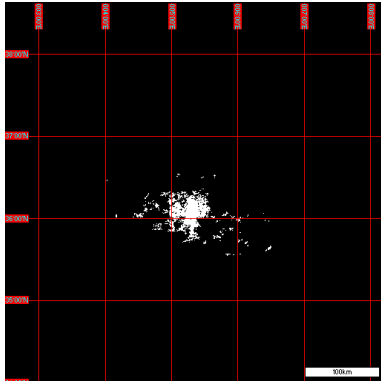


Figure IV.10 d

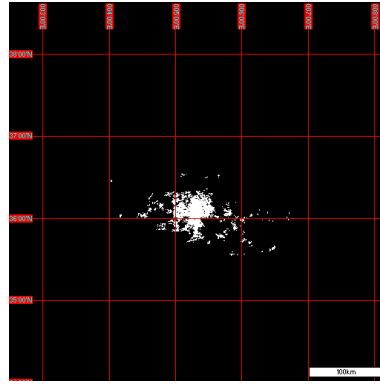


Figure IV.10 e

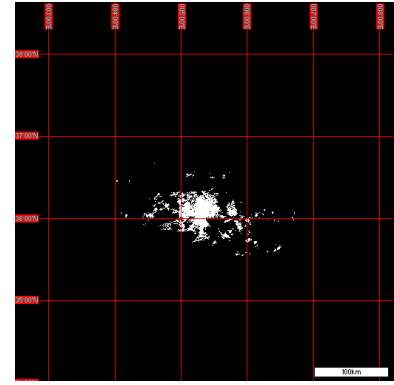


Figure IV.10 f

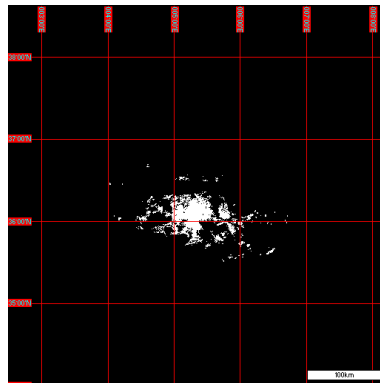


Figure IV.10 g

Figure IV.10 Influence de la hauteur sur la surface des échos

Figure	Hauteur de l'antenne (m)	S (pixels)	A max(°)	A min(°)
IV.10.a	0	1010	2.3	-0.1
IV.10.b	50	1688	2.2	-0.3
IV.10.c	100	2040	1.9	-0.4
IV.10.d	150	2292	1.8	-0.5
IV.10.e	200	2638	1.6	-0.5
IV.10.f	250	3009	1.4	-0.6
IV.10.g	300	3380	1.2	-0.6

Tableau IV.2 Influence de la hauteur sur la surface des échos

Avec:

S: Surface des échos.

A max: Angle de tir maximal.

A min : Angle de tir minimal.

A partir de ces résultats, on remarque que plus on surélève l'antenne radar, on aura une meilleure visibilité de l'horizon et plus la surface des échos augmente. Le choix de l'emplacement d'un radar est complexe en prenant en compte ces deux facteurs.

IV.6.2.1 Echos du sol par rapport à l'ouverture du faisceau

Nous avons aussi étudié l'influence de l'ouverture du faisceau sur la distribution des échos du sol. Après plusieurs tests, on a retenu une valeur maximale qui varie entre $2,2^\circ$ à 6° et minimale qui oscille entre $-0,3^\circ$ à 0° pour l'angle d'azimut (voir la figure IV.11)

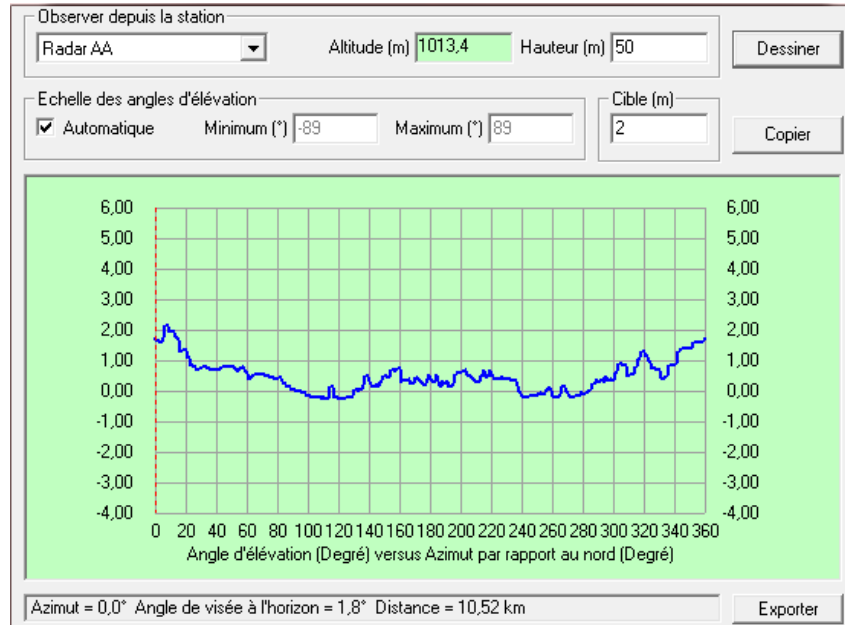


Figure IV.11 Horizon visible par rapport au radar de Ain Arnat

En modifiant le balayage d'angle d'élévation de 1° , on obtient les échos de sol représentés sur la figure IV.12.

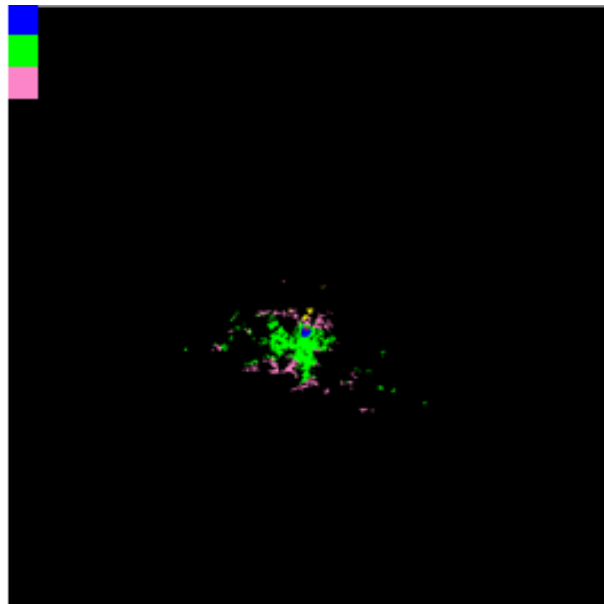
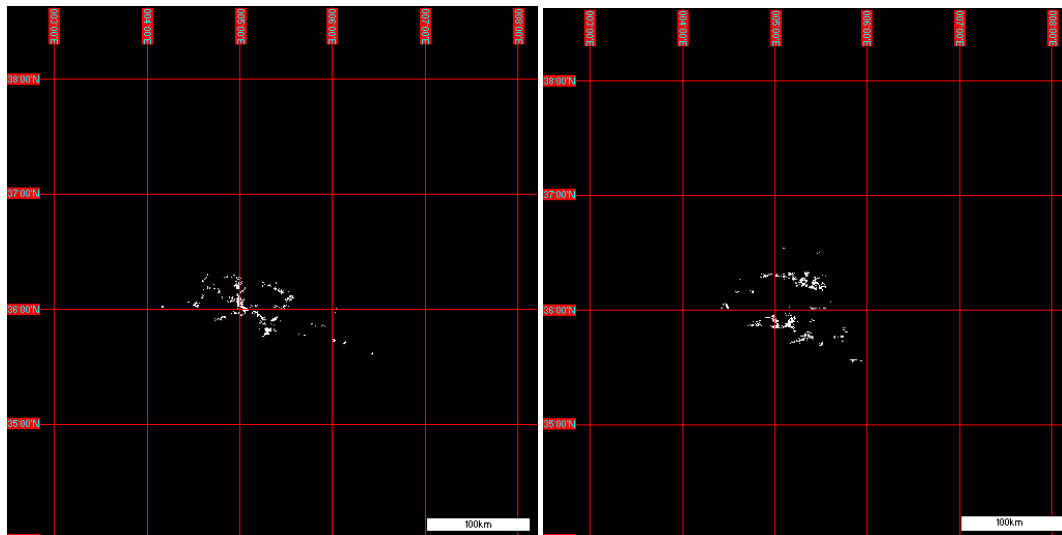


Figure IV.12 Influence de l'angle d'élévation sur les échos du sol

Les variations de ce paramètres sont illustrées par les figures IV.13 a et IV.13b



a Angle compris entre -0.3° et 2.2°

b Angle compris entre 0° et 2.2°

Figure IV.13 Influence de l'angle d'élévation sur les échos du sol

IV.7 Site radar de Bordeaux France

Bordeaux, une ville située dans le sud-ouest de la France à 36 Km de la côte atlantique. Le climat est de type océanique. Les conditions sont plutôt homogènes bien que durant la saison d'été, les systèmes frontaux sont souvent réduits à des lignes convectives associées à un front froid en surface. L'intensité moyenne annuelle avoisine les 900 mm. Le radar est situé à l'aéroport de Bordeaux Mérignac ($44^{\circ}52'N$, $0^{\circ}30'O$). Il travaille dans la bande S avec une puissance crête de 500 kW. La largeur de l'impulsion est de 5 μs et la fréquence de réception est de 300 Hz. L'ouverture du faisceau est à 3 dB est de $1,8^{\circ}$. Un système numérique analysant les réflectivités sur 8 bit appelé SANAGA (System Analogique Numérique d'Acquisition des Gains Africains) (Sauvageot et Despeaux, 1990) permet le traitement et le stockage des données. Le radar de Bordeaux fait partie du réseau français opérationnel géré par Météo France. La région est pratiquement plate. Les images sont en grande partie contaminées par les échos du sol causés par la zone industrielle de Bordeaux sur un rayon de 40 Km. Le MNT relatif à cette région est présenté dans la figure IV.13

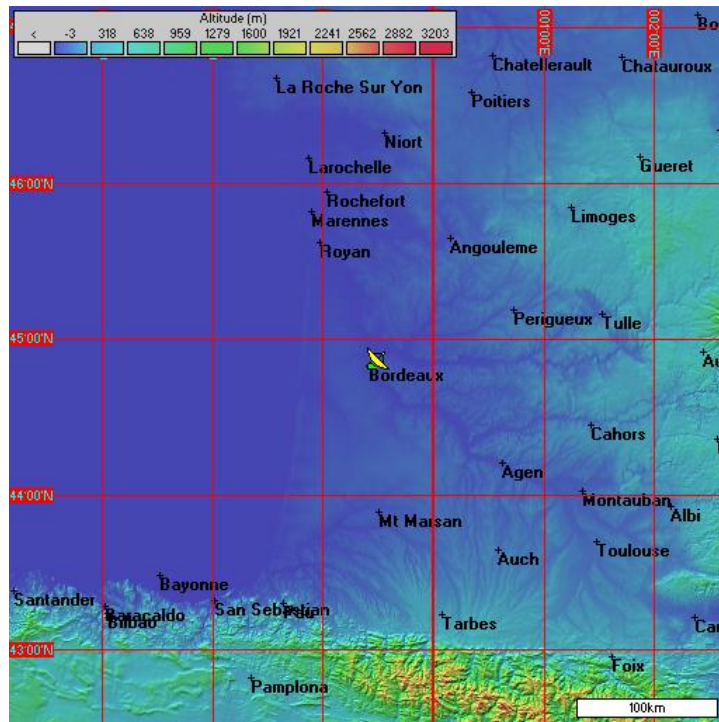
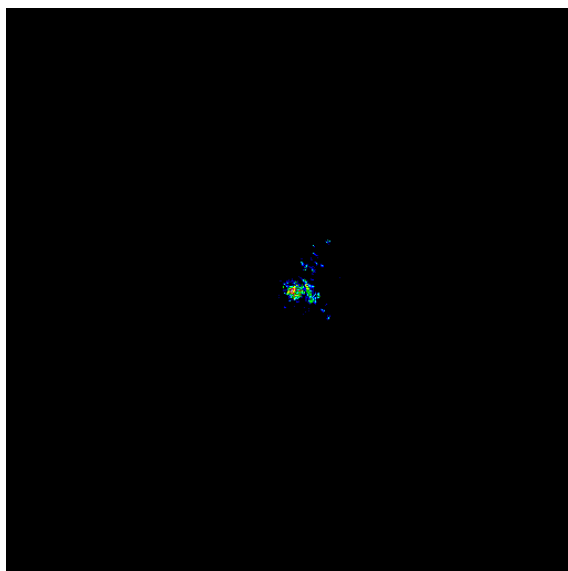
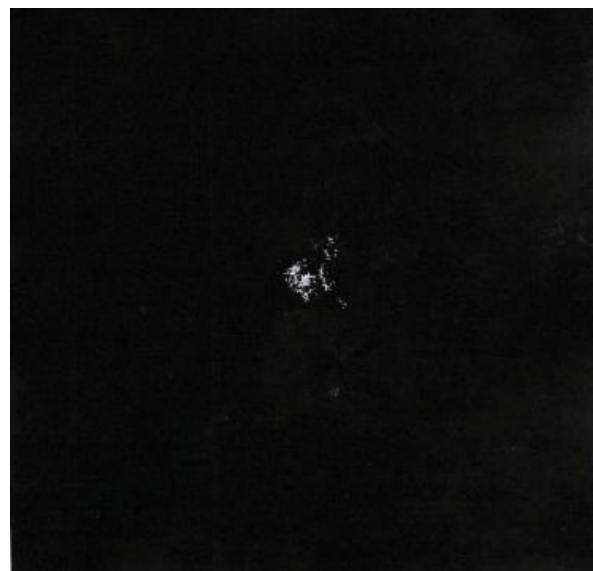


Figure IV.14 MNT centré sur le radar de Bordeaux

La cartographie des échos du sol réels et simulés pour le site Bordeaux est représentée par la figure IV.15



a Echos du sol réel



b Echos du sol simulés

Figure IV.15 Cartographie des échos du sol du site de Bordeaux

Le calcul des surfaces occupées donne :

Echos du sol réels : 568 pixels

Echos du sol simulés : 517 pixels

Taux d'erreur relatif = 8%

Ce taux d'erreur un peu élevé peut se traduire par le changement urbain opéré depuis la conception des images SRTM dans les années 2000.

IV.8 Site radar de Dakar Sénégal

Le Sénégal est d'une superficie de 196 722 Km². Le pays est couvert de plaines onduyantes ne dépassant pas des dizaines de mètres au-dessus du niveau de la mer. Les contreforts du Fouta-Djalou, au Sud-est du pays, culminent à 494 m dans la région de Kédougou ; les collines du Fouta-Toro, dans l'Est, bordent la vallée du fleuve Sénégal. Sur la côte, à l'extrémité de la presqu'île du Cap Vert, les collines volcaniques des mamelles atteignent 104 m ; dans le reste du pays, quelques grandes dunes donnent l'illusion d'un relief. Les côtes d'une longueur totale 531 Km, présentent une large diversité.

Le climat est tropical. Il se caractérise par une longue saison sèche de novembre à juin et une saison humide de juillet à octobre, plus longue en Casamance. En effet, la côte de Saint Louis à la presqu'île Cap Vert est soumise à l'alizé durant toute la saison sèche. La température diurne moyenne est de 23.3°C en janvier, et de 28.3°C en juillet. Les précipitations annuelles sont plus importantes dans le Sud, avec une moyenne de 1400 mm, et chutent considérablement dans le Nord, avec une moyenne de 318 mm. Au centre, on observe des régions non soumises à l'influence marine ; le Ferlo est une vaste plaine en voie de désertification que la sécheresse de ces dernières décennies, accentuée par l'Harmattan soufflant du désert, a transformée en une plaine de poussière.

Le radar de Dakar est installé sur une tour de 300m d'altitude au niveau de l'aéroport de Yoff, à l'Est de Dakar. Ses coordonnées géographiques sont 14°44'N et 17°29'O. Ce radar travaille durant les périodes pluviales uniquement. Le climat de Dakar est sahélien les chutes de pluie ont souvent lieu pendant la période s'étalent entre juillet et septembre. L'intensité moyenne des précipitations varie entre 300 mm à Saint Louis et 1500 mm au Cap Skirring (Nzeukou and Sauvaget, 2002). Le MNT relatif à la région de Dakar est représenté par la figure IV.16

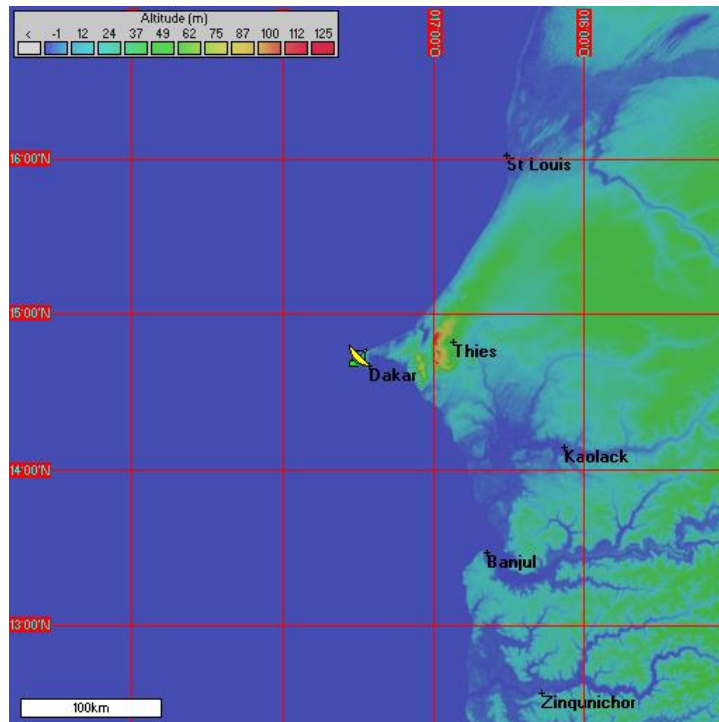
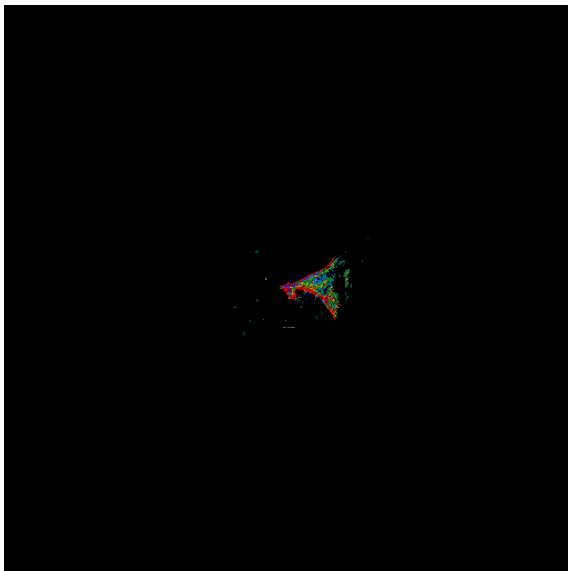
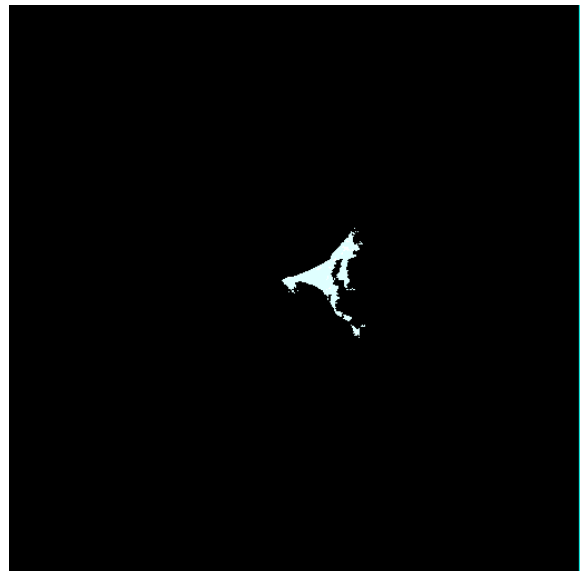


Figure IV.16 MNT centré au tour du radar de Dakar

La cartographie des échos du sol réels et simulés pour le site Dakar est donnée par la figure IV.17



a Echos du sol réel



b Echos du sol simulés

Figure IV.17 Cartographie des échos du sol du site de Dakar

En calculant, le nombre de pixels d'échos du sol de chacune des deux images :

Echos du sol réels : 1050 pixels

Echos du sol simulés : 1043 pixels

Taux d'erreur relatif = 0,6%

Chapitre IV Résultats et interprétations

Il représente un excellent résultat, dû à la caractéristique topographique quasiment plate de la région de Dakar.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré l'utilité du modèle numérique de terrain MNT dans l'étude et la caractérisation des échos du sol. Nous avons aussi analysé l'influence de la hauteur de l'antenne et de l'angle d'ouverture du faisceau sur la surface des échos parasites. Nous avons montré que la surélévation de l'antenne ne résout pas le problème des échos parasites.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de l'influence de la surface terrestre sur la propagation des ondes électromagnétiques. En premier lieu, nous avons rappelé les différents phénomènes physiques observés au cours de l'interaction onde-matière.

Pour une meilleure compréhension des différents phénomènes, nous avons utilisé le logiciel radio mobile pour la prédiction des liaisons radios. Cette façon de faire est une étape nécessaire dans le dimensionnement des liaisons point à point. Différents cas ont été analysés : l'émetteur et le récepteur en visibilité directe mais aussi en présence d'obstacles.

En deuxième partie, notre intérêt a porté sur le radar météorologique. Nous avons abordé l'influence des échos du sol dans la réduction des performances des radars au sol. Il est alors capital de choisir le meilleur site possible pour rendre toute sa fiabilité au radar. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle numérique de terrain SRTM pour simuler les échos du sol autour du radar. Cette méthode permet de restituer l'ensemble des échos parasites sur une image. Nous avons présenté et défini le modèle numérique du terrain SRTM utilisé au cours de ce travail.

La méthode proposée a consisté en l'étude de la visibilité des pixels du MMT en considérant la courbure de la croûte terrestre

Les résultats obtenus pour le site de Megriss pour un angle de tir rasant inférieur à 1° , montrent l'enregistrement d'un nombre considérable d'échos du sol bien que le radar fut placé à une altitude supérieure à 1700 mètres.

Les reliefs des montagnes du Djurdjura, des Bibans et des Babors ont influé sur les résultats. La carte d'échos simulés, comparée à l'image radar prise en temps clair donne une erreur de l'ordre de 4%. Nous avons étudié par ailleurs l'influence de l'angle de tir et de la surélévation de l'antenne sur la qualité de l'image radar. Nous avons trouvé que pour un angle de tir de l'ordre de 1° , les échos parasites sont quasiment nuls.

Nous pouvons affirmer que la surélévation de l'antenne ne réduit pas le nombre d'échos. Pour le site de Ain Arnat, nous avons enregistré moins d'échos parasites. Ce qui nous a amené à proposer le déplacement du radar de Megriss à Ain Arnat. Les résultats obtenus pour les deux autres sites, à savoir Bordeaux (France), et Dakar (Sénégal) sont jugés encourageants malgré le fort taux d'urbanisation constaté cette dernière décennie au niveau des trois sites. Il y a lieu de noter qu'au niveau de Dakar, l'erreur entre la surface des échos du

Conclusion générale

sol simulée et réelle est de l'ordre de 1%. Ce résultat est tout à fait probant et s'explique par la topographie de ce pays qui ne présente pas de forts obstacles.

Compte tenu des résultats obtenus, la solution préconisée est intéressante aussi bien en météorologie qu'en navigation aérienne. Elle peut être appliquée aussi pour le choix de l'emplacement des relais ou émetteurs radio, téléphoniques, télévision ...etc.

Il serait intéressant d'appliquer d'autres MNT dont la résolution soit plus faible. De même, on peut recenser les zones inondables selon différentes hypothèses (niveau du débit dans le fleuve, rupture ou non des digues ...) pour prévenir et épargner des vies humaines. Là encore, connaissant par modélisation les hauteurs d'eau, il faut s'appuyer sur un modèle numérique de terrain pour déterminer les zones inondées, et leur hauteur de submersion.

Bibliographie

Bibliographie

Battan. L. J: Radar Observation of the Atmosphere, Chicago: University of Chicago Press, 1973.

Boithias Lucien : Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre. Edition Dunod, 1984.

Chrisman. J. N, Ray. C. A: A first look at the operational (data quality) improvements provided by the open radar data acquisition (ORDA) systems. In 21st Int. Conf. on Infor. Processing Sys. (IIPS) for Meteorol. Oceanog, and Hydrol. San Diego CA P4R.10.2005.

Darricau. J : Physique et théorie du radar, tome I et II. Edition Sodipe Paris. 1981.

Deygout. J: Multiple knife-edge diffraction of microwaves, IEEE Trans. on Ant. and Prop., Vol. AP-14, No. 4, pp. 480-489. 1966.

Doviak. R. J. and Zrnic. D. S : Doppler Radar and Weather Observations, 2nd Ed., Mineola, NY: Dover Publications, 2006.

Ducastell François : Propagation troposphérique et faisceaux Hertiens transhorizon. Edition Chiron, 1961.

Liebe, H.J, Hufford, G.A, and Cotton, M.G: Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz. Proceedings of AGARD 52nd Specialists. Meeting of the Electromagnetic wave propagation panel, Palma de Mallorca, Spain. 1993.

Mie. G: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen [Contribution to the optics of suspended media, specifically colloidal metal suspensions], Ann. Phys., vol. 25, pp. 377–445, 1908

Probert-Jones. J. R: The Radar Equation in Meteorology, Q. J. R. Meteorol. Soc., vol. 88, pp. 485–495, 1962

Bibliographie

Recommandation UIT – R P.837 – 1 Caractéristiques des précipitations pour la modélisation de la propagation.

Röttger . J and Larsen. M. F: UHF/VHF radar techniques for atmospheric research and wind profiler applications. Chapter 21 in Radar in Meteorology, Atlas (ed.) Boston: AMS, pp. 235–281. 1990.

Sachidananda. M and Zrnic. D.S: Clutter filtering and spectral moment estimation for Doppler weather radars using staggered pulse repetition time (PRT). J. Atmos. Ocean. Tech.,17. Pp323-331. 2000.

Sauvageot. H, Despaux. G : SANAGA: Un système d'acquisition numérique et de visualisation des données radar pour la validité des estimations satellitaires de précipitations. Veille climatique satellitaire, 31,51-55, 1990

Sauvageot. H: Radar météorologique. Artech House, Boston, p361. 1992.

Sizun Hervé: propagation des ondes radioélectriques des réseaux terrestres. 2008.

Uijlenhoet. R, Steiner. M, and Smith. J.A: Variability of raindrop size distributions in a squall line and implications for radar rainfall estimation. J. Hydrometeorol. Vol. 4, pp. 43-61, 2003.

Van Der Pol. B, Bremmer. H: Operational calculus. Cambridge University. 1950.

Wieler. J. G and Schrader. W. W: Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) systeme characterization and design constraints. In 25st Int. Conf. on Radar Meteorol. AMS, pp.J7-J9.1991.