

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Réseaux & Télécommunication

présenté par

Bentekkouka Ahlem

&

Mostefaoui Abla

Simulation de la Surface Equivalente Radar (SER) d'objets simples et complexes

Proposé par Dr : Yacine Bennani

Année Universitaire 2016-2017

Dédicaces

Malgré les obstacles que j'ai confronté, j'ai terminé mes études avec succès...

Je dédie mon travail à ma mère qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçoit à travers ce travail aussi modeste soit-il l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude...

A ma meilleure amie d'enfance Nesrine « Merci d'être toujours à mes côtés »

A ma confidente Ikram merci pour son soutien de moral et ses précieux conseils ...

A mes copines que j'ai connue récemment mais qu'elles ont marqué ma vie : Amina, Sabrina, Manel et Lyna pour une sincérité si merveilleuse, jamais oubliable...

A mon agréable binôme Abla pour sa patience et son encouragement...

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie...

Que Dieu les bénisse tous et leurs préserve la santé et le bonheur.

Ben tekkouka Ahlem

Dédicace

À mes très chers parents qui ont toujours soutenu, aimé, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre mes études dans les meilleures conditions possibles et n'avoir jamais cessé de m'encourager tout au long de mes années d'étude. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour

A ma sœur Loubna

A mon frère Abderrahmane

A ma meilleure amie d'enfance Aïcha

Mes grands-mères

A mon grand-père

*Et A la mémoire de mon grand-père Mostefaoui Abdelkader que dieu
L'accueille dans son vaste paradis*

À toute ma famille et tous mes amis

A Mon cher binôme Ahlem

À tous ceux qui me sont chers.

Mostefaoui ABLA

Remerciements

Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté, et la patience de mener ce travail.

Nous voudrions exprimer nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, M^f Yacine BENNANI, pour ses judicieux conseils qui nous ont apporté une grande aide, pour son dévouement tout au long du travail. Nous lui témoignons nos respects les plus distingués pour les meilleures conditions d'encadrement qu'il nous a offert.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions aussi tous nos professeurs de l'université USDB qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Enfin, nous désirons remercier nos familles et nos amis et camarades qui nous ont apporté leur soutien incessant pendant toute la durée de travail.

ملخص:

العمل الذي تم تحقيقه في مشروع نهاية الدراسة، يحتوي على دراسة التفاعل بين الموجة الكهرو مغناطسية و هدف ذو شكل عشوائي بحيث يتم ملاحظته بواسطة الرادار. هذا التفاعل يسمح بحدوث عدة ظواهر من الانقسام، و قمنا باختبار نوعين من هذه الظواهر ليتم دراستها في عملنا هذا و هما كالتالي، انعكاس المضاربة (انعكاس بسيط)، وكذا مضاعفات انعكاسات من الدرجة الثانية. من أجل نمذجة هذه الظواهر، اخترنا مجموعة من الطرق منها الطرق المقاربة المتعلقة بالهندسة البصرية و هذا لمتابعة مسار الاشعاع بعد الانعكاس، والبصرية الفيزيائية لحساب نوع حقل انتشار الموجة. الناتج عن سطح الهدف المدروس و وصولا الى حساب المساحة المكافئة للرادار. وقد تم تصميم الهدف من قبل مجموعة من المثاثات. وكذا قمنا باستخدام برنامج (CAO) و ايضا استعملنا اختبار للرؤية من اجل تحديد المنطقة المغطاة من طرف الموجة الالكترو مغناطسية و هذا لحساب نوع انتشار الموجة. وقد تم تقييم النموذج المتقدم من خلال المحاكاة والمقارنات مع النتائج المنشورة في المقالات العلمية.

كلمات المفاتيح: المساحة المكافئة للرادار، منظور المادة، منظور هندسة الجسم، طريقة التيار المتكافئ

Résumé : Le travail réalisé dans ce projet de fin d'étude porte sur l'étude de l'interaction entre une onde électromagnétique et une cible quelconque observé. Cette interaction donne lieu à plusieurs phénomènes de dispersion, difficile à prendre compte tous à la fois, dans le cadre de ce travail, nous avons pris en compte deux phénomènes qui sont la réflexion spéculaire et les réflexions multiples à l'ordre deux. Afin de modéliser, ces phénomènes, nous avons utilisé une combinaison de méthodes dites asymptotiques à savoir l'Optique Géométrique (OG) et l'optique Physique (OP). La cible a été modélisée par un ensemble de facettes triangulaires, générées par un logiciel de CAO, un test de visibilité. Le modèle développé a été évalué via des simulations et des comparaisons avec les résultats publiés dans la littérature.

Mots clés : SER, Optique Physique (OP), Optique Géométrique(OG), Méthode des Courants Equivalents (MCE), CAO.

Abstract : The work that has been realized in this project of the end of study, contains the study of interaction between an wave electrommagnetic and any target This interaction gives a place of many phenomenona of divide, hard to take them all at one time, at this kind of work ,we choosed two phenomenona, those whom are the speculative reflection , and those with a multiples reflections with order two.In order to model, these phenomenons ,we choosed a combination of methods named asymptotic related to geometrical optic (OG), and the physical optic (PO) for the calculation of the diffuse sort.By the surface lightened of the target, and in consequently, radar cross section(RCS).the target has been modeled by a group of triangular facet, generis by a logical of (CAO), a test of visibility .the developed model has been evaluated via simulations and comparisons with the published results in literature.

Keywords : radar cross section(RCS), Scattering mechanism, Physical Optic(PO), Geometrical Optic(GO), Equivalent Currents Method(ECM), CAD.

Listes des acronymes et abréviations

CW : Continuous wave.

FMCW : Frequence Modulated Continuous wave.

FERMAT : Fonctionnalités Pour L'électromagnétisme et le Radar Par les Méthodes Asymptotiques.

GPR : Ground Penerating Radar

MCE : Méthode des Courante Equivalent

OG : Optique Géométrique

OP: Optique Physique.

PSR : Primary surveillance radar

RADR: Radio Detection and Ranging.

SAR : Synthetic Aperture Radar.

TGD : Théorie Géométrique de la Diffraction.

SR : Simple Réflexion

DR : Double Réflexion

FEM : Fenite Element method

RADAR :Radio Detection And Ranging

MLFMM : Multi Level Faste Muiipo Method

FB : Ford Bakward

FB-SA : Ford Bakward with Spectral Acceliration

FDTD :Finite Differance Time-Domain

Table des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : Contexte et généralités sur les radars	
1.1 Introduction	4
1.2 Les concepts fondamentaux de système radar.....	4
1.2.1 Définition de radar	4
1.2.2 Equation radar	5
1.2.3 Le principe fonctionnement d'un radar.....	6
1.2.4 Les applications radar.....	7
1.2.5 Classification des systèmes radar.....	8
a. Radars imageurs/Radars non imageurs	8
b. Radars primaire	9
c. Radars à impulsion.....	9
d. Radars à onde continue.....	9
e. Radars secondaire.....	10
1.3 Surface Equivalent Radar(SER).....	11
1.3.1 Définition de la SER	11
1.3.2 Région fréquentielles.....	12
a. Région de Rayleigh.....	12
b. Région de Résonance.....	12
c. Région des hautes fréquences ou région optique.....	12

1.3.3	Polarisation.....	13
1.4	Champ proche et champ lointain.....	14
1.5	Interaction onde cible.....	14
1.5.1	Définition de canal de propagation	14
1.5.2	Mécanismes de dispersion.....	15
a.	Réflexions spéculaire.....	15
b.	Réflexions multiples.....	15
c.	Diffraction aux discontinuités.....	16
d.	Diffraction aux arêtes.....	16
e.	ondes de surface	16
f.	Diffraction par un somme.....	17
g.	Dispersion par des cavités.....	17
1.6.	Outils de simulations existants.....	16
1.6.1	POFACETS.....	18
a.	.présentation du logiciel POFACETS.....	18
b.	Mise en marche.....	19
1.6.2	FEKO.....	19
1.6.3	FERMAT	20
1.7	Conclusion.....	21
	CHAPITRE 2 : Méthodes de calcul de la SER	22
2.1	Introduction... ..	22

2.2 Méthodes rigoureuses	22
2.2.1 Méthode des moments.....	23
2.2.2 Méthodes des éléments finies	23
2.2.3 Méthodes des différences finies.....	24
2.3 Méthodes asymptotiques.....	24
2.3.1 Méthodes orientées (rayon).....	24
2.3.1. a Optique géométrique.....	24
2.3.1. b Théorie géométrique de la diffraction.....	25
2.3.1. c Théorie uniforme de la diffraction	26
2.3.1. d Synthèse sur les méthodes de rayon.....	26
2.3.2 Méthode orientées (courant).....	27
2.3.2. a optique physique.....	27
2.3.2. b Théorie physique de la diffraction.....	28
2.3.2. c Méthode des Courants Équivalents (MCE)	29
2.3.3 Coulage des méthodes asymptotiques.....	29
2.4 Les méthodes de lancer et tracé de rayons	30
2.4.1 Le lancer de rayons.....	31
2.4.2 Le tracé de rayons	32
2.5 Conclusion.....	32
CHAPITRE 3 : Résultats de simulation.....	
3.1 Introduction	34
3.2 Problématique et Méthodologie	34
3.3 Modèle géométrique d'une cible complexe	34

3.3.1 Effets d'ombrage	35
3.3.2 Test de visibilité.....	35
3.3.3 Principe de l'algorithme du peintre	36
3.4 Méthodes asymptotiques retenues.....	37
3.4.1 Application de l'optique géométrique (OG).....	38
3.4.2 Application de l'optique physique (OP).....	38
3.5 Résultats de simulation.....	41
3.5.1 Caractéristiques techniques de la machine utilisée dans la simulation	41
3.5.2 SER d'une plaque carrée.....	41
3.5.3 Temps de calcul de la SER d'une plaque carrée.....	42
3.5.4 SER d'une plaque carrée.....	43
3.5.5 SER d'un dièdre parfaitement conducteur.....	44
3.5.6. SER d'un dièdre	46
3.6 Détermination des facettes candidates à la double réflexion	47
3.7 Projection spéculaire et subdivision linéaire.....	47
3.8 Algorithme général de calcul.....	48
3.9 la SER d'un dièdre.....	50
3.10 SER d'un bateau modèle générique.....	50
3.11 Conclusion	52
Conclusion générale.....	53
Annexe A les équations de Maxwell	55

Annexe B Présentation de l'outil Pofacets.....	57
Annexe C Matrice de passage	59
Bibliographie.....	62

Liste des figures

Figure1.1 : Configuration de l'observation (mono-statique bi-statique).....	5
Figure1.2 : Applications radar.....	8
Figure1.3 : Classification des systèmes.....	11
Figure1.4 : Surface Équivalente Radar d'une Sphère et les différentes régions.....	12
Figure1.5 : Polarisation de l'onde incidente dans le système de coordonnées de la cible.....	13
Figure1.6 : Diffusion spéculaire.....	15
Figure1.7 : Réflexions multiples.....	15
Figure1.8 : Diffraction aux discontinuités.....	16
Figure1.9 : Diffraction aux arêtes.....	16
Figure1.10 : Onde de surface.....	17
Figure1.11 : Diffraction par un sommet.....	17
Figure1.12 : Dispersion par cavité.....	17
Figure1.13 : Phénomène de dispersion sur un avion.....	18
Figure 1.14 : Fenêtre de démarrage de Pofacets.....	19
Figure 2.1 : Réflexion modélisée par optique géométrique	25
Figure 2.2 : Représentation des différents types de rayons générés par une structure	26
Figure 2.3 : Calcul du champ rayonné par l'optique physique.....	28
Figure 2.4 : Principe du lancer de rayons.....	31
Figure 2.5 : Principe du tracé de rayons.....	32
Figure 3.1 : Modèle Géométrique d'une cible complexe.....	35
Figure 3.2 : Principe de test de Visibilité	36
Figure 3.3 : Algorithme du peint.....	37
Figure 3.4 : Teste de visibilité pour $(\theta, \varphi)=(45^\circ, 45^\circ)$	37

Figure 3.5 : Diffusion par un objet arbitraire en champ lointain.....	39
Figure 3.6 : Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation.....	41
Figure 3.7 : Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation.....	42
Figure 3.8 : Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation.....	42
Figure 3.9 : Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation.....	44
Figure 3.10 : Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation.....	44
Figure 3.11 : Modèle géométrique du dièdre.....	44
Figure 3.12 : SER mono-statique d'un dièdre parfaitement conducteur.....	45
Figure 3.13 : SER mono-statique d'un dièdre parfaitement conducteur.....	46
Figure 3.14 : Sélection des facettes candidates à une double réflexion.....	47
Figure 3.15 : Projection spéculaire et subdivision linéaire.....	48
Figure 3.16 : Algorithme de subdivision linéaire.....	48
Figure 3.17 : Algorithme général de calcul.....	49
Figure 3.18 : SER mono-statique d'un dièdre parfaitement conducteur.....	50
Figure 3.19 : modèle générique d'un bateau.....	50
Figure 3.20 : SER d'un bateau en modèle générique configuration.....	51
Figure 3.21 : SER d'un bateau en modèle générique configuration 2	52

Liste des tableaux

Tableau3-1 : Temps de calcul de la SER d'une plaque.....	43
Tableau3-2 : Temps de calcul pour le dièdre configuration 1.....	45
Tableau3-3 : Temps de calcul pour le dièdre configuration 2.....	46
Tableau3-4 : Temps de calcul pour le dièdre configuration 3.....	50

Introduction générale

L'acronyme RADAR (Radio Detection And Ranging) résume bien son rôle. Les systèmes radar peuvent également mesurer les vitesses radiales des réflecteurs, ou encore leurs directions d'arrivée. Contrairement aux systèmes optiques, ils peuvent opérer dans n'importe quelle condition météorologique et avoir des portées de détection bien supérieures, de l'ordre de centaine de kilomètres. De nombreuses applications des systèmes radar se sont développées : cartographie du sol (imagerie SAR), détection d'obstacles, détection par métrique d'intrus, aide au stationnement (automobile), ...etc. Le premier objectif des systèmes radars a été la détection des cibles pouvant présenter un intérêt stratégique ou un danger potentiel. De tels systèmes émettent des ondes radiofréquences vers leur environnement, puis analysent les échos produits par les réflecteurs présents. Le traitement de ces échos permet de détecter les cibles renvoyant des échos suffisamment forts, et de déterminer leurs distances par rapport au radar par une mesure de temps de propagation.

Le radar n'est pas le fruit du travail d'une personne unique : il découle d'une longue chaîne de découverte qu'il est impossible de résumer en quelques pages. Le début des travaux sur les ondes électromagnétiques en 1861, année à laquelle James Clerk Maxwell publia son article fondateur (*On Physical Lines of Force*) où sont unifiées les équations régissant les lois de l'électricité et du magnétisme, découvertes antérieurement par Gauss, Ampère et Faraday, et qui furent plus tard mises sous leur forme définitive vectorielle, par Heaviside, en 1884. Ensuite une longue série d'innovations techniques, souvent faite du tâtonnement et de découvertes fortuites, qui marqua les débuts de l'histoire du radar et de la radio. C'est donc en 1904 que Hülsmeyer a déposé un brevet pour son Telemobiloskop, appareil conçu pour détecter la présence de navires dans la brume par la réflexion d'ondes électromagnétiques (EM) sur le métal, en jouant sur l'orientation de l'antenne. Il s'agissait d'un appareil

relativement rustique, puisqu'il ne permettait pas de mesurer la distance, il utilisait, pour produire une onde, un éclateur, ainsi qu'une antenne primitive ressemblant à ce que nous appellerions aujourd'hui une antenne Yagi. L'intérêt des États et des armateurs pour ce type d'appareils ne fut cependant pas très vif, et l'invention de Hülsemeyer se solda par un échec commercial.

Le potentiel d'un tel instrument en surveillance aérienne ne fut pas encore perçu, sans doute, parce que celui-ci n'était pas encore au point. Durant la première guerre mondiale et l'après-guerre, la veille antiaérienne reposait essentiellement sur un réseau de guetteurs humains, et ce n'est que fortuitement que l'on découvrit, en divers endroits du globe, que le passage d'un avion dans la ligne de trajet direct entre un émetteur radio et un récepteur pouvait perturber la transmission. Ces phénomènes furent ensuite étudiés, puis exploités dans un but de détection, en quadrillant le territoire d'un maillage d'émetteurs et de récepteurs, émettant en onde continue, et détectant le passage d'un avion par les battements provoqués par interférence de l'onde émise avec l'onde réfléchie.

C'est durant les années 1930 que le radar commença à acquérir sa forme finale, avec Des travaux menés notamment aux États-Unis, en France, au Royaume Uni, au Japon et en Allemagne. Ainsi, c'est juste à la veille de la seconde guerre mondiale que le radar est né. La guerre permit d'en réaliser la première utilisation opérationnelle, d'en affiner la doctrine d'emploi, et d'entrevoir certains défauts et certaines nouvelles utilisations inattendues. Au lendemain de la guerre, le radar trouva de nouvelles utilisations civiles, du contrôle aérien à la météorologie, à l'imagerie du sol terrestre et celui d'autres planètes. Il retrouva également la première fonction pour laquelle il avait été développé : la surveillance maritime.

C'est également au cours des années 1950 que le concept d'imagerie en antenne synthétique fut formulé, en 1951 par Carl Wiley, ingénieur chez Goodyear. Les premiers essais expérimentaux furent réalisés dès 1952 en utilisant des techniques holographiques, car la puissance de calcul nécessaire pour réaliser les algorithmes de manière numérique n'étaient alors pas disponible. Il aura aussi fallu attendre la redécouverte de l'algorithme de transformée de Fourier rapide par Cooley et Tukey en

1965 pour pouvoir envisager une application numérique en temps réel. En effet cet algorithme joue un rôle essentiel pour le traitement de signaux radar.

Le travail présenté dans ce rapport, s'inscrit dans le contexte radar et consiste à estimer et simuler la surface équivalente radar (SER) de cibles canoniques et de forme arbitraire, en utilisant une combinaison de méthodes asymptotiques de courant et de rayon à savoir l'Optique Physique (OP), l'Optique Géométrique (OG), qui permet de modéliser les phénomènes électromagnétiques lors de l'interaction d'une onde EM avec des cibles de différentes dimensions par rapport à la longueur d'onde. La réalisation de tels calculs nécessite la mise en œuvre d'outils logiciels performants. L'étude décrite dans ce mémoire porte donc sur le développement d'un moyen de calcul informatique pour simuler la SER.

Cette étude est organisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un survol sur l'existant et quelques notions fondamentales de radar, ainsi que la surface équivalente radar (SER), et les différents paramètres intervenants dans son calcul.
- Le deuxième chapitre, expose les différentes techniques et méthodes permettant la modélisation de l'interaction entre une onde électromagnétique et une cible pour calculer le champ diffusé et la surface équivalente radar (SER).
- Le troisième chapitre, met l'accent sur la démarche adoptée pour concevoir le modèle de calcul de la SER d'objets canoniques et complexes, qui est basé sur la combinaison de l'optique physique et l'optique géométrique (OG-OP) afin de valider notre approche, nous avons comparé quelques résultats de simulation avec les résultats publiés dans la littérature. Le mémoire se termine par une conclusion et perspectives.

Chapitre1 Contexte et Généralités sur les radars

1.1 Introduction

Pendant de nombreuses années, les ingénieurs ont étudié comment les propriétés géométriques et physiques des objets complexes affectent le comportement de la réponse électromagnétique rétrodiffusée. Le problème de la surface équivalente radar (SER) d'une cible de forme complexe peut être réduit, dans des cas particuliers, à un ensemble de problèmes portant sur calcul de la SER d'objets dont la forme est relativement simple, avec laquelle les différentes parties de la cible sont rapprochées, et puis les résultats de calcul sont additionnés vectoriellement.

Nous présentons dans ce premier chapitre, des généralités sur les radars, définition de la surface équivalente radar (SER), ainsi que les différents mécanismes de dispersion qui sont générés suite à l'interaction d'une onde électromagnétique avec une cible de forme complexe. Notre premier chapitre se termine par un survol rapide de quelques outils de simulation de la SER à savoir POFACTS, FEKO ainsi que FERMAT.

2 Les concepts fondamentaux en radar

1.2.1 Définition de radar

Cet équipement de détection et de localisation s'est appelé successivement détection électromagnétique (France), Radio Location (Grande-Bretagne).

Le sigle **RADAR** signifie :

Radio : les radars fonctionnent à des fréquences comprises entre 3 MHz (ondes de surface ou par rétrodiffusion ionosphérique) et 100 GHz (courtes portées).

Détection : les seules cibles utiles, définies par les spécifications de besoin des utilisateurs, Donc avec rejet des signaux parasites après identification. Des paramètres discriminants sont déterminés pour séparer signaux utiles et parasites.

And : simultanément.

Ranging : localisation des cibles.

Cible radar

Au sens large du terme, une cible (Target en anglais) est l'objet qui interfère avec l'onde EM émise, et réfléchit une partie de l'énergie vers le radar.

On fait la distinction entre une cible est l'objet qu'on veut détecter et le « clutter » que représente les objets non désirées (réflexion de la mer, de la terre, pluie, oiseaux, Météorites.....) qui interceptent aussi l'énergie et la renvoient [1]

1.2.2 Equation radar

L'équation radar représente le bilan de puissance entre le dispositif d'émission et celui de la réception, l'environnement et la cible. Dans le cas général, l'émetteur et le récepteur radar se localisent à différents endroits par rapport à la cible comme le montre la figure 1.1, Ce qui correspond à une configuration bi-statique. Dans le cas, où l'émetteur et le récepteur se situent sur la même plateforme, l'onde est reçue par la même antenne, le radar est dit mono-statique.

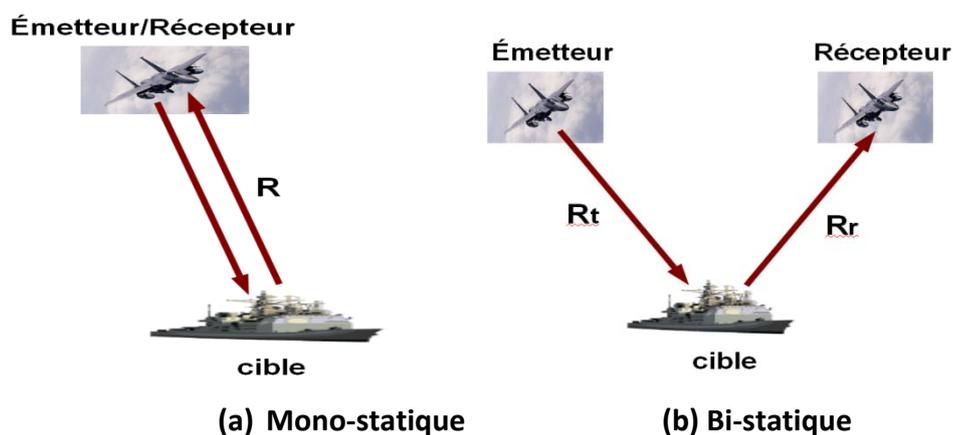


Figure1.1 Configuration de l'observation (mono-statique bi-statique)

On peut déterminer la puissance reçue par le récepteur à partir de l'équation radar puisque cette dernière décrit le bilan de puissances sur un trajet émetteur-cible-

récepteur. L'expression de l'équation radar en configuration bi-statique est donnée par :

$$P_r = \frac{P_t G_t}{L_t} \frac{1}{4\pi r^2 L_{mt}} \times \sigma \frac{1}{4\pi R_t^2 L_{mr}} \times \frac{G_r \lambda_0^2}{4\pi L_r} \times \frac{1}{L_p} \quad (1.1)$$

Où :

P_t : Puissance émise.

G_t : Gain de l'antenne émettrice.

L_t : Facteur de pertes à l'émission.

L_r : Facteur de pertes à réception.

r_t : Distance entre la cible et l'émetteur.

σ : SER en m^2 .

$L_{mr} L_{mt}$: Facteurs de perte du milieu.

R_t : Distance récepteur-cible.

G_r : Gain de l'antenne réceptrice.

L_p : Facteur de pertes dues à la polarisation.

Dans le cas mono-statique où l'antenne d'émission est utilisée comme antenne de réception, on a $G_t = G_r$, $R_t = r_t$, $L_t = L_m = L_r$, et $L_{mt} = L_{mr}$, l'expression de l'équation radar peut se réduire à:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda_0^2 \sigma}{(4\pi)^3 r_t^4} \quad (1.2)[4]$$

1.2.3. Principe de fonctionnement d'un radar

Le Radar est un dispositif de radiolocalisation, d'où le nom anglais (Radio Detection and Ranging). Ce nom décrit les deux fonctions généralement dévolues à ces équipements de détection des 'cibles utiles'. Ce terme cibles utiles reflète le premier objectif d'un Radar ainsi que son principe de fonctionnement qui consiste à envoyer des ondes (continues ou des impulsions) sur un obstacle. L'objectif est de détecter plusieurs cibles (par mesure du champ diffusé) les quelles sera nécessaire de faire un tri pour ne présenter au manipulateur que les cibles utiles (aux quelles on s'intéresse particulièrement).

La notion de localisation implique deux caractéristiques importantes dans le système de mesure : la précision et la résolution dans l'espace et dans le temps (définissant les performances d'un Radar). Une mesure de la vitesse cible-Radar est généralement nécessaire. Cette localisation s'effectue bien sûr dans un espace limité par la portée du dispositif qui dépend du type d'onde, de la fréquence et de la puissance émise. La détection et la mesure doivent être renouvelées, ainsi dans tout l'espace surveillé et à chaque instant. Les Radars développés actuellement intègrent la partie analogique (émission-réception) et la partie numérique (soft) ce qui permet une décision en temps réel de la présence ou l'absence d'une cible.

L'émetteur produit une onde radio à haute fréquence qui est acheminée via un guide d'onde et émise dans l'espace. Lorsqu'elle rencontre une cible, elle est réfléchi. La mesure et l'analyse du signal de l'écho(ou réfléchi) comparée au signal émis permettent de déterminer des informations (position, vitesse, distance).

1.2.4. Les applications radar

Les principaux domaines d'application du radar sont la surveillance et le contrôle que ce soit dans un contexte civil ou militaire. On utilise, par exemple, le radar pour le contrôle aérien, maritime et routier. Le radar est utilisé en météorologie pour l'observation de la terre et de sa biomasse. La figure (1.2) recense en grande partie les applications radar actuelles. Pour les applications strictement militaires, on retrouve, par exemple, les radars de défense aérienne qui détectent et suivent les avions ou missiles représentant un danger ainsi que les radars de contre batterie servant à déterminer le point de départ d'un tir d'artillerie adverse.

Il y a naturellement les radars de contrôle aérien et routier mais également les radars météo Il y a, d'autre part, les radars du surface, tels que les radars à détection d'objets souterrains (GPR : Ground Penetrating Radar) et à travers les murs, utilisés pour le déminage de terrains et la détection en milieu urbain.

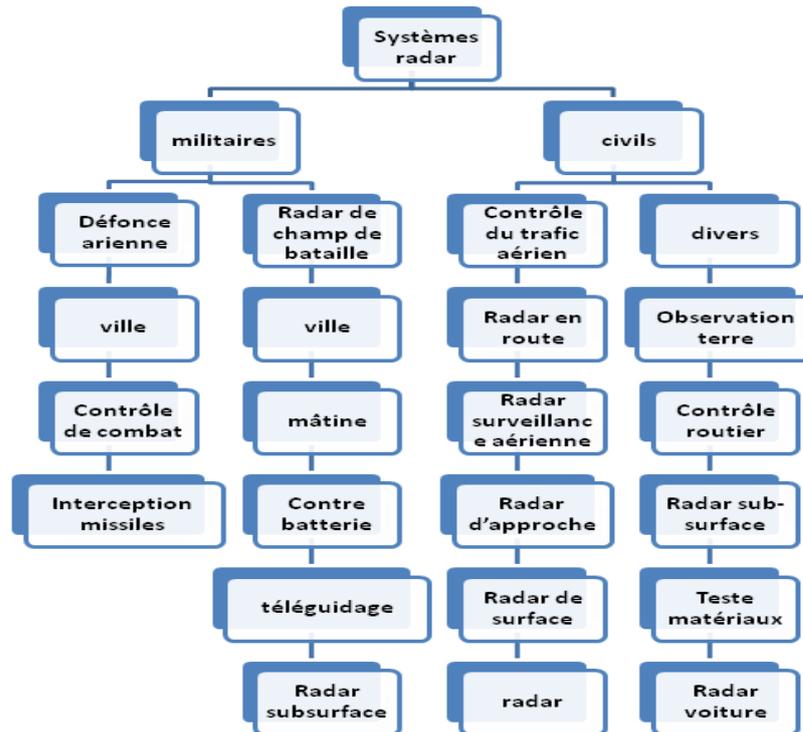


Figure1.2 : Applications radar [2]

1.2.5. Classification des systèmes radar

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les équipements radars utilisent des qualités et des technologies différentes. Ceci se traduit par une première classification des systèmes radars.

a. Radars imageurs / Radars non imageurs

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet (ou de la zone) observé. Les radars imageurs sont utilisées pour cartographier la terre, les autres planètes, les astéroïdes, etc. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles. Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars (les petits, sur le bord de la route) et les radios altimètres. Ce type de radar est également appelé diffus mètres puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé.

b. Radars primaires

Un radar primaire (primary surveillance radar ou PSR en anglais) émet des impulsions hyper fréquences à l'aide d'une antenne, les impulsions sont partiellement réfléchies par l'objet volant et reviennent à l'antenne. Un récepteur mesure le temps entre l'émission et le retour des impulsions. Cette durée et la direction de l'impulsion permettant de calculer la position de l'objet volant.

Il existe aujourd'hui des radars primaires avec détermination de la position en deux dimensions (2D) (distance et azimut) ou en trois dimensions (3D) (distance, azimut, altitude). Les radars primaires permettant de détecter et de suivre dans l'espace aérien surveillé tous les objets qui réfléchissent suffisamment les ondes radars (y compris les phénomènes météorologiques, les vols d'oiseaux, les échos de sol, etc...).

c. Radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance, puis il attend l'écho du signal transmis pendant un certain temps avant qu'elle ne transmette une nouvelle impulsion.

Le Radar à impulsions est généralement utilisé lorsque cela est nécessaire pour détecter des cibles au sein d'un certain volume de l'espace et de déterminer la distance et le relèvement et dans certains cas, la vitesse de chaque cible. Le système de radar pulsé nécessitent généralement l'émission de grandes puissances et peut-être très complexe et coûteuse.

d. Radars à onde continue

Un radar à onde continue (CW) ou à ondes entretenues est un type de radar caractérisé par l'émission d'ondes en continu, modulées en fréquence ou non.

Les radars à ondes entretenues émettent sans interruption un signal hyperfréquence. L'écho est donc reçu et traité continuellement. Pour empêcher l'énergie émise d'entrer directement dans le récepteur et de contaminer celle revenant de la cible.

Les radars à onde continue sont de deux types

• Radars à onde continue non modulée

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue non modulé ne

permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour le contrôle de vitesse sur les routes (cinémomètres radars).

- **Radars à onde continue Modulée**

L'inconvénient des radars CW est leur incapacité à mesurer des distances, puisqu'ils ne produisent pas les impulsions servant de « tops d'horloge ». La variation de la fréquence émise apporte une solution à ce problème. Dans cette méthode, la variation permanente du signal émis autour d'une fréquence fixe de référence est utilisée pour détecter des cibles fixes.

Lorsqu'un écho est reçu par le radar, la fréquence du signal réfléchi par la cible peut être mesurée. En se référant à l'instant où la même valeur de fréquence a été émise, il devient possible de mesurer le temps entre l'émission et la réception de cette fréquence, donc distance radar-cible, comme pour un radar à impulsions. Comme il est généralement difficile d'émettre "proprement" des fréquences aléatoires, les radars à onde continue modulée en fréquence (FMCW) font varier progressivement la fréquence de leur signal au rythme de rampes ascendantes et descendantes.

Ce type d'équipement est souvent utilisé comme « radioaltimètre ». Le radioaltimètre est utilisé pour mesurer la hauteur exacte d'un avion durant la phase d'atterrissage.

- e. Radars secondaires**

Le radar secondaire fonctionne selon un principe différent : la cible qu'il éclaire génère (de façon active) les signaux de réponse. Le radar secondaire transmet des impulsions hyperfréquences .Celles-ci n'ont pas pour but d'être réfléchies, la cible étant équipée d'un transpondeur qui les reçoit et les traite. Ensuite le transpondeur met en forme et émet un message de réponse qui peut être reçu et décodé par notre radar secondaire .Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique) [1]

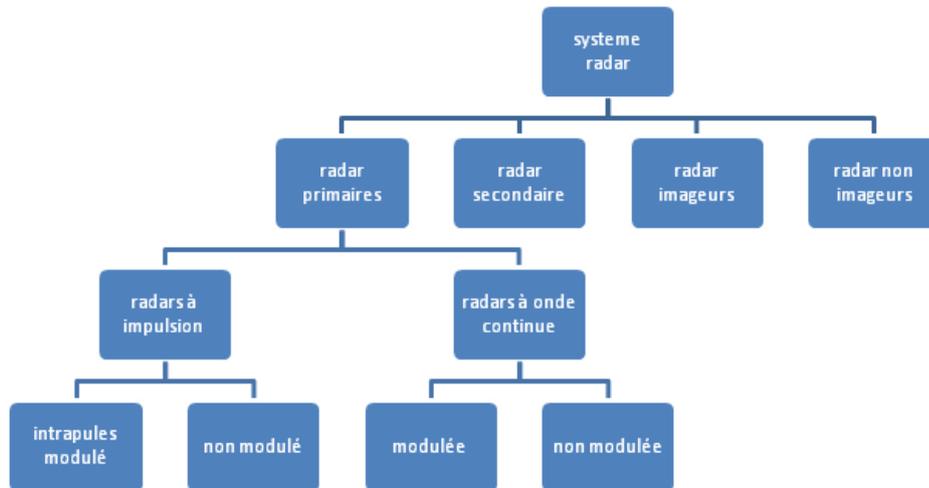


Figure 1.3 Classification des systèmes RADAR [1]

1.3. Surface Equivalent Radar

1.3.1. Définition de la SER

La surface équivalente radar (SER) est une grandeur couramment employée pour caractériser la réflectivité électromagnétique d'un obstacle que nous noterons σ . La SER est proportionnelle au rapport de la densité de puissance diffusée sur la densité de puissance incidente au niveau de l'obstacle. Son expression simplifiée (en polarisation vv ou hh) est donnée par les expressions (1.3. a) et (1.3.b).

$$\text{Pour la polarisation verticale : } \sigma_{vv} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_{\theta}^S|^2}{|E_{\theta}^I|^2} \quad (1.3.a)[4]$$

$$\text{Pour la polarisation horizontale : } \sigma_{hh} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_{\phi}^S|^2}{|E_{\phi}^I|^2} \quad (1.3.b)$$

La section efficace radar est un nombre scalaire qui dépend d'un grand nombre de paramètres:

- La position de l'émetteur par rapport à la cible.
- La position du récepteur relativement à la cible.
- La géométrie de la cible.
- Les matériaux composant la cible.
- L'orientation angulaire de la cible par rapport à l'émetteur et au récepteur.
- La fréquence ou la longueur d'onde utilisée.
- La polarisation de l'émetteur et celle du récepteur.

1.3.2 Régions fréquentielles

Les caractéristiques de rayonnement d'une cible dépendent fortement de la fréquence de l'onde incidente. On distingue trois régions de fréquence où la SER d'une cible est très différente. Ces régions sont définies en fonction du rapport entre la dimension principale D , d'une cible et la longueur d'onde λ du signal incident.

a. Région de Rayleigh ($D \ll \lambda$) : À ces longueurs d'onde, la variation de phase de l'onde incidente est petite le long de la cible. En conséquence, le courant incident sur la surface de la cible est approximativement constant en phase et en amplitude, indépendamment de la forme de la cible. Dans cette région, la SER varie comme $1/\lambda^4$ et on dit que la cible est électriquement petite.

b. Région de résonance ($D \approx \lambda$) : À ces longueurs d'onde, la variation de phase du courant

sur le corps de la cible est significative. Toutes les parties de la cible contribuent au type de diffusion. La SER oscille en fonction de la longueur d'onde. Cette région de fréquence est aussi appelée "région de Mie".

c. Région des hautes fréquences ou région optique ($D \gg \lambda$) : À ces longueurs d'onde, il y a plusieurs cycles dans la variation de phase du courant sur le corps de la cible. Conséquemment, le champ diffusé sera angulairement très dépendant dans cette région de fréquence, la SER peut être indépendante de λ et on dit que la cible est électriquement grande (Fresnel) [3].

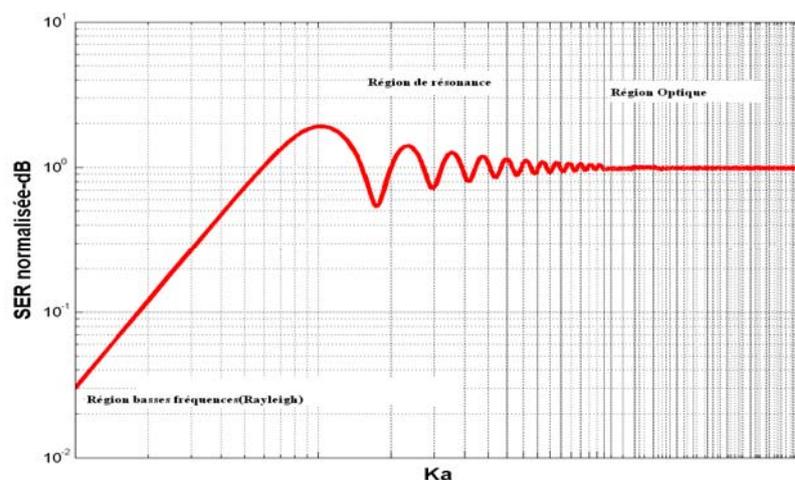


Figure 1.4 Surface Équivalente Radar d'une Sphère et les différentes régions

1.3.3 Polarisation

La polarisation d'une onde plane est indiquée par la direction d'oscillation du champ électrique E . elle est définie par rapport à une référence. Lors du calcul de la SER, la référence choisie est habituellement le système de coordonnées de la cible comme le montre la (figure 1.5). En général, la polarisation de l'onde radar incidente ne sera pas parallèle aux axes du système de coordonnées de la cible. En conséquence, il est nécessaire de décomposer la polarisation de l'onde incidente le long des axes du système de coordonnées de la cible. Pour une cible dans le champ lointain, les composants vectoriels d'une onde incidente plane sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde et ils sont tangents à une sphère centrée sur la cible. Ainsi, deux composants orthogonaux sont suffisants pour spécifier l'onde. Ils sont habituellement choisis pour être les composants θ et ϕ d'un système de coordonnées sphériques centré sur la cible. Le champ incident s'exprime comme :

$$E_i = E_{i\theta} \vec{\theta} + E_{i\phi} \vec{\phi} \quad (1.4)$$

Où $\vec{\theta}$ et $\vec{\phi}$ sont les vecteurs unitaires dans le système de coordonnées de la cible

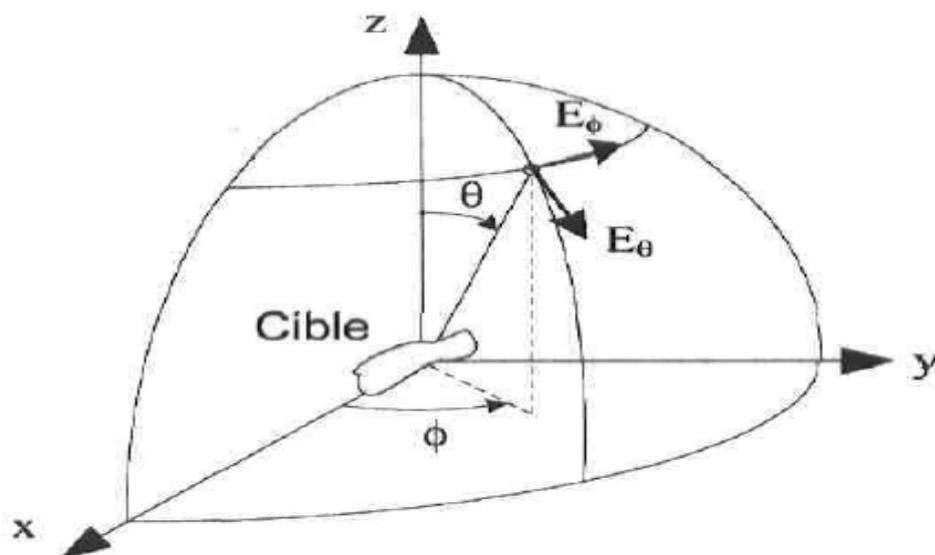


Figure 1.5 Polarisation de l'onde incidente dans le système de coordonnées de la cible [3]

1.4. Champ proche et champ lointain

Il est à noter que selon la figure 1.4, La surface équivalente radar d'un objet est définie à une distance r très grande, afin qu'elle soit indépendante de la distance entre les équipements de mesure et la cible. Ainsi σ dépend seulement de la forme de l'objet, de l'angle d'observation, de sa composition matérielle et de la fréquence de travail [4].

Cette définition convient aux premières applications en majorité militaires où les cibles se trouvent à une distance relativement grande. Il faut cependant préciser ce que signifie une distance grande. Un objet se trouve à une grande distance d'une source s'il est dans son champ lointain. La question qui se soulève de façon naturelle est : quelle est la limite entre le champ proche et le champ lointain d'une source ? Dans la littérature, les limites de D_2/λ [5] et $2D_2/\lambda$ [6] sont rapportées. Cette distance correspond à une erreur maximale de 1 dB dans le calcul de σ_{max} pour une cible non plane dont les termes de deuxième et troisième ordre des champs réfléchis sur son ouverture ont, au maximum, les variations d'amplitude et phase de 1 dB et $\pi/8$ respectivement [7]. σ_{max} correspond à la réflexion mono-statique maximale de la cible.

1.5. Interaction onde cible

1.5.1 Définition de canal de propagation

Par définition, un système de transmission radioélectrique permet de transformer un signal électrique émis $e(t)$ en un signal électrique reçu $s(t)$ par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Le canal de propagation correspond au système qui fait passer du signal $e(t)$ au signal $s(t)$ et tient donc compte des interactions entre les ondes électromagnétiques et leur environnement.

1.5.2 Mécanismes de dispersion

La dispersion sur un objet d'une onde électromagnétique se produit en haute fréquence quand la longueur d'onde incidente est très petite par rapport aux dimensions de la cible. Ces mécanismes de dispersion sont les suivantes:

a. Réflexion spéculaire

La réflexion est dite spéculaire lorsque l'on se place dans la direction pour laquelle l'onde diffuse le maximum d'énergie. Dans le cas d'une plaque, si l'onde émise est perpendiculaire à la cible l'onde réfléchie se dirige alors vers la source.

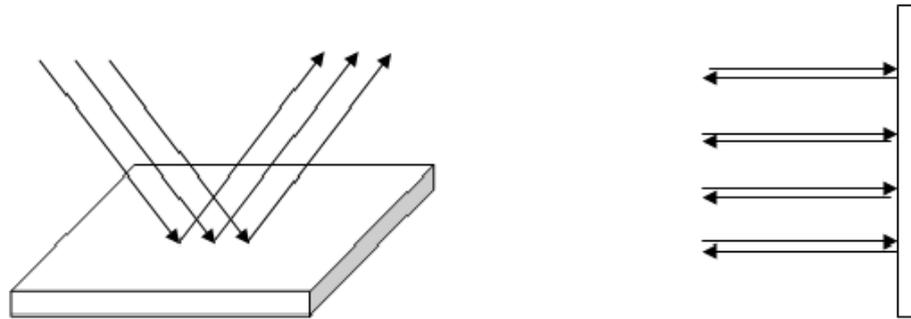


Figure 1.6 Réflexion spéculaire

b .Réflexions multiples

Une onde arrive sur une surface non plane peut avoir plusieurs réflexions qui dépendent de la géométrie de la cible. Il y a alors création d'interférences qui peuvent être destructrices ou constructives elles se retranchent ou s'ajoutent avec d'autres ondes réfléchies.

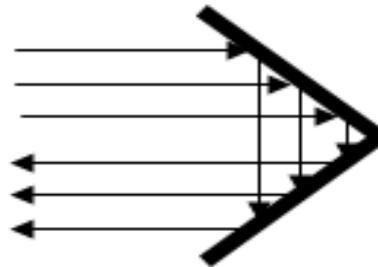


Figure 1.7 Réflexions multiples

c. Diffraction aux discontinuités

Elles font varier le niveau de l'enveloppe des lobes secondaires.

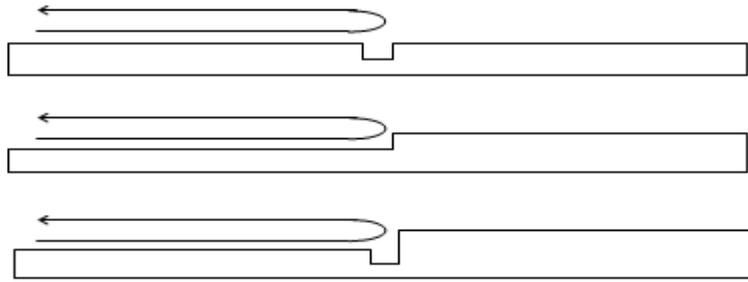


Figure 1.8 Diffraction aux discontinuités

d .Diffraction aux arêtes

Elles se produisent lorsque l'onde est perpendiculaire aux arêtes. Elles dépendent donc de la polarisation de l'onde.

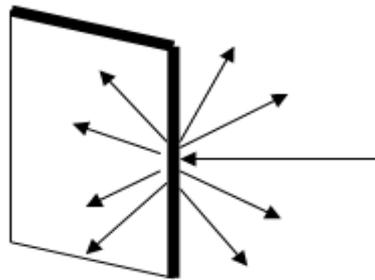


Figure1.9 Diffraction aux arêtes

e. Ondes de surface

Lorsque l'onde est réfléchiée par une discontinuité d'une surface plane ou courbée ou réfléchiée par les arêtes de l'objet. L'onde changera de direction jusqu'à revenir vers la direction du radar.



Figure 1.10 Ondes de surface

f. Diffraction par un sommet

Cette diffraction est illustrée sur la figure 1.11

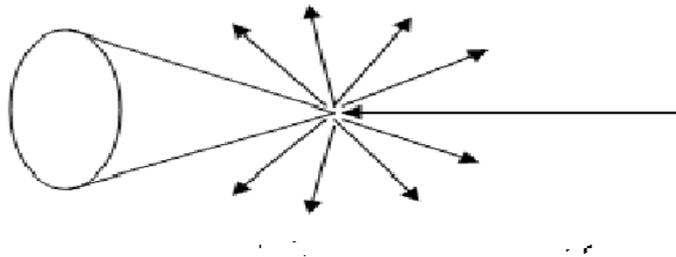


Figure 1.11 Dispersion par cavité

g .Dispersion par des cavités

La figure 1.11 représente le phénomène de dispersion par cavité

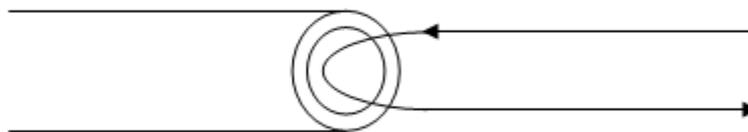


Figure 1.12 Dispersion par des cavités

L'ensemble de ces phénomènes de dispersion est représenté sur un avion est donnée par figure 3.12. Ces mécanismes de dispersion sont nombreux et il est très difficile de les prendre en compte dans les modèles de calcul de la SER. Dans notre travail, nous

avons pris en compte deux phénomènes, qui sont la réflexion spéculaire ainsi que les multi-trajets à l'ordre 2.

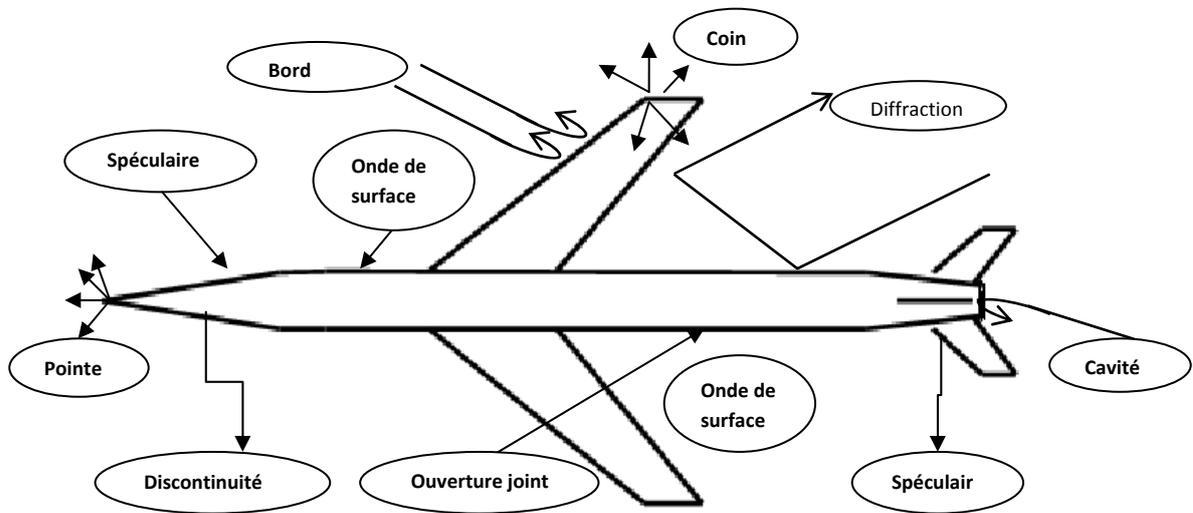


Figure 1.13 Phénomène de dispersion sur un avion

1.6. Outils de simulation existants

1.6.1. Pofacets

a. Présentation du logiciel POFACETS

POFACETS : est une implémentation de l'approximation optique physique pour prédire la surface équivalente radar (SER) des objets complexes. Il utilise les fonctionnalités de calcul scientifique de MATLAB et ses fonctions d'interface utilisateur graphique (GUI) pour fournir un encodage sans erreur des paramètres d'entrée et un calcul efficace de la surface équivalente radar (SER). POFACETS fournit un outil pratique pour représente la SER de cibles de formes complexes par des facettes triangulaires.

Le logiciel calcule la SER mono-statique ou bi-statique de l'objet pour les paramètres spécifiés par l'utilisateur et affiche les pour la géométrie du modèle et son SER. Notez que les calculs de POFACETS n'incluent pas de réflexions multiples, les effets d'ombrage, la diffraction par les bords ou les ondes de surface.[Annexe B]

b. Mise en marche

Copiez le fichier zippé sur le disque dur désiré et décompressez-le. Les programmes et les répertoires présentés dans la figure 1.18 devraient être présents. Une fois l'application MATLAB démarrée, l'utilisateur doit modifier le répertoire actuel de MATLAB dans le répertoire de POFACETS. Ensuite, POFACETS peut être exécuté en tapant pofacets à l'invite MATLAB.

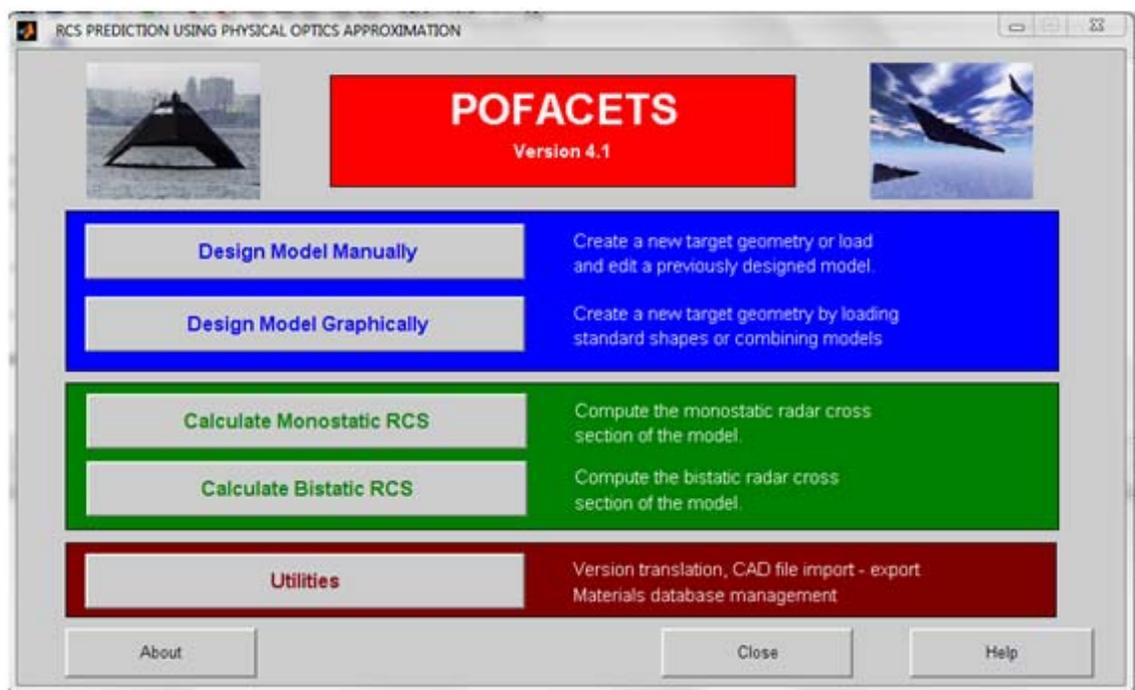


Figure 1.14 Fenêtre de démarrage de Pofacets

1.6.2. FEKO

a. Présentation du logiciel FEKO

FEKO est un logiciel commercial développé par la société EMSS dédié à la simulation électromagnétique. Le but de ce logiciel est de proposer une résolution numérique plus ou moins exacte des équations de Maxwell [Annexe A]. Les champs d'application du logiciel sont variés [8] :

- Conception d'antennes
- Placement d'antennes sur des systèmes
- Conception de composants radiofréquences et micro-ondes

- Analyse de rayonnement
- Analyse de compatibilité électromagnétique
- Analyse des effets biologiques des ondes électromagnétiques

Le logiciel calcule :

- Les courants circulant sur les structures métalliques
- Les champs électriques et magnétiques rayonnés, en champ proche comme en champ lointain.
- Les directivités et les gains d'antennes
- Les paramètres d'entrée d'une antenne (impédance, admittance, taux d'onde stationnaire, puissance)
- Les couplages entre différentes structures (analyse de paramètres S)
- L'absorption des champs électromagnétiques par un corps humain et le calcul de SAR.

1.6.3. Fermat

Le logiciel FERMAT (Fonctionnalités pour l'Electromagnétisme et le Radar par les Méthodes Asymptotiques) a été développé en partenariat avec des chercheurs de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, des ingénieurs de l'office national d'études et de Recherches aérospatiales et des informaticiens de la société OKTAL-SE. Cette association a permis la mise au point dans un outil logiciel de méthodes appropriées à la prédiction des champs résultant des interactions d'une onde électromagnétique avec des scènes complexes.

Lorsque les dimensions des objets étudiés deviennent de plus en plus grandes par rapport à la longueur d'onde, les méthodes asymptotiques se révèlent davantage appropriées et peuvent même être l'unique solution dans les cas très hauts fréquences. Ces méthodes se sont développées sous la forme d'une part de l'Optique Géométrique (OG) et de son extension la Théorie Uniforme de la Diffraction (TUD), qui sont des méthodes asymptotiques de rayons, d'autre part de l'Optique Physique(OP) complétée par la Méthode des Courants Equivalents (MCE) et la Théorie Physique de la Diffraction (TPD), qui sont des méthodes asymptotiques de courants.

La technique du lancer de rayons utilisée dans FERMAT, consiste à traiter des pinceaux formés de rayons élémentaires issus de l'émetteur, permettant de prendre en compte

la propagation de l'onde et ses diverses interactions électromagnétiques (réflexion, diffusion, diffraction) avec les objets de la scène.

L'association du lancer de rayons et de l'électromagnétisme est la principale originalité qui a conduit à la réalisation du logiciel FERMAT. L'approche FERMAT permet de disposer d'un outil unique pour les études concernant les applications radar, le rayonnement d'antennes, la CEM inter systèmes et la propagation dans des environnements complexes [9].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les radars, une définition de la surface équivalente radar (SER), suivi d'une présentation des différents mécanismes de dispersion nés lors de l'interaction d'une onde électromagnétique avec une cible de forme complexe. Nous avons terminé ce chapitre par un survol de quelques outils de simulation de la Surface Equivalente Radar (SER).

Chapitre2 Méthodes de calcul de la SER

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons montrer les différentes techniques et méthodes permettent la modélisation de l'interaction entre une onde électromagnétique et une cible, ensuite calculer le champ diffusé et la surface équivalente radar.

2.2 Méthodes rigoureuses

Dans la famille des modèles rigoureux, nous trouvons des méthodes analytiques et des méthodes numériques. Tandis que les premières permettent d'obtenir une solution rigoureusement exacte du problème mais ne peuvent être appliquées que dans quelques cas canoniques (sphère, cylindre infini...), les méthodes numériques se basent sur une discrétisation du problème et permettent ainsi de résoudre tout problème de diffraction en théorie. Ainsi, dès que le problème fait intervenir des objets de forme ou de nature plus complexes que les quelques cas canoniques connus, les méthodes numériques sont les seules à conclure à une résolution "exacte" du problème [10, 11] ; la seule approximation venant de la discrétisation du problème. L'évolution rapide des calculateurs depuis une cinquantaine d'années a permis l'utilisation de telles méthodes et la résolution de problèmes complexes de la diffraction. L'inconvénient majeur de ces méthodes est que le nombre d'inconnues peut devenir très important lorsque les objets sont de grandes dimensions devant la longueur d'onde. Outre l'aspect problématique du stockage en mémoire des inconnues, le temps de calcul peut vite devenir prohibitif et rendre ces méthodes inutilisables. Ces méthodes sont donc généralement employées pour cerner le domaine de validité des méthodes approchées.

Les trois plus célèbres sont la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies, et la méthode des moments.

2.2.1 Méthode des moments

La MoM (MoM : Method of Moments) [12] est une méthode intégrale, qui repose sur le développement en série de fonctions de base, pondérées par des coefficients inconnus, des courants sur la surface de l'obstacle. Les équations intégrales sont exprimées à l'aide de ces séries et sont ensuite projetées sur une série de fonctions de test, choisies selon un critère de minimisation de l'erreur. Cette procédure permet de discrétiser les équations intégrales du domaine fréquentiel et de poser ensuite le problème sous la forme d'un système matriciel du type :

$$\bar{Z}X=b \quad (2.1)$$

Où \bar{Z} est la matrice impédance, X contient les inconnues du problème, b est la donnée du problème : le terme de sources. L'inversion de \bar{Z} pour résoudre l'équation précédente peut être obtenue par une méthode directe. D'autres méthodes numériques, exactes et rapides sont utilisées pour diminuer la complexité de l'inversion matricielle et s'affranchir de la décomposition LU en résolvant le système matriciel $\bar{Z}X=b$ par une procédure itérative. Les plus célèbres de ces méthodes sont : La FMM (Fast Multipole Method) [13], La MLFMM (Multi-Level Fast Multipole Method) [14], la BMIA (Banded matrix Iterative Approach) [15], la FB (Forward Backward) [16], et la FB-SA (Forwardbackward with Spectral Acceleration) [17, 18]. Notons que les matrices obtenues sont beaucoup plus petites que celles calculées avec les méthodes FEM, FDTD. La taille des matrices augmente avec la fréquence (pour un pas de discrétisation fixe par rapport à la longueur d'onde) et les matrices peuvent alors devenir très difficiles à stocker et/ou à inverser.

2.2.2 Méthode des éléments finis

La FEM (Finite Element Method), [19] est une méthode différentielle, qui repose sur une discrétisation du domaine de calcul grâce à des éléments géométriques adaptés : les éléments finis. Ces éléments peuvent être de diverses formes mais doivent former un pavage de l'espace considéré. Usuellement les éléments finis sont des tétraèdres. A l'intérieur de chaque élément, la fonction cherchée subit une approximation polynomiale dont les coefficients sont inconnus. Par un choix judicieux des

coefficients, la FEM impose automatiquement Les conditions de continuité de la fonction d'un élément à l'autre. La FEM

Permet donc de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée suffisamment fiable.

2.2.3 Méthode des différences finies

La FDTD (Finite Difference Time-Domain) [20] est une méthode différentielle, qui repose sur une discrétisation des opérateurs de dérivation et fait également intervenir un maillage de l'espace. Il s'agit donc d'une double discrétisation spatiale et temporelle. Son avantage par rapport à la FEM est qu'elle peut traiter des problèmes non linéaires Et/ou non stationnaires.

2.3 Méthodes asymptotiques

Les méthodes asymptotiques sont basées sur les solutions données par les équations de Maxwell en hautes fréquences. Ceci signifie que les dimensions de l'obstacle sont grandes devant la longueur d'onde.

Les méthodes asymptotiques peuvent être regroupées en deux approches :

2.3.1 Méthodes orientées « rayon » (OG, TGD, TUD) :

2.3.1. a Optique Géométrique (OG)

L'optique géométrique est basée sur le principe de Fermat où l'onde se propage selon des rayons rectilignes.

On peut exprimer le champ électrique ou magnétique en tout point d'un rayon C (Q) en fonction du champ connu en un point C(E)

$$C(Q) = e^{jk_0 r} \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + r)(\rho_2 + r)}} C(E) \quad (2.2) [4]$$

Où : C le champ électrique ou magnétique,

$r = [EQ]$ la distance entre deux positions E et Q sur le même rayon, ρ_1 et ρ_2 les rayons de courbure du front d'onde au point E.

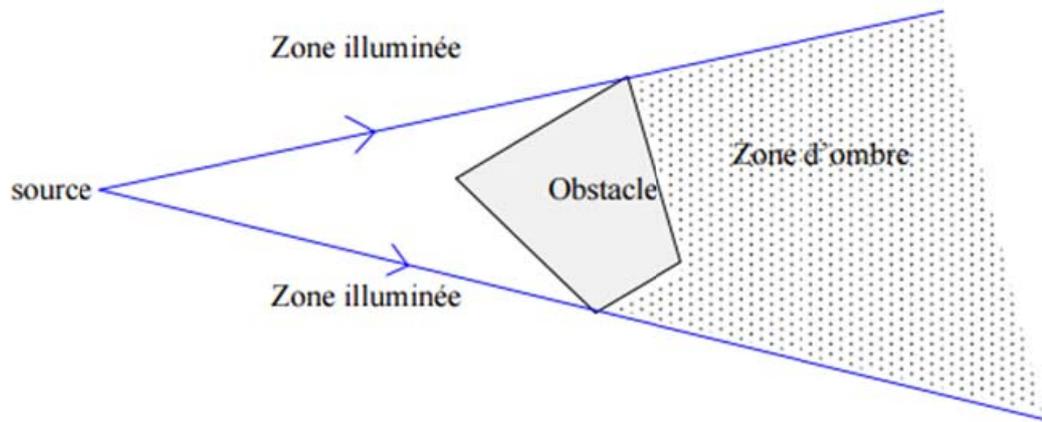


Figure 2.1 Réflexion modélisée par Optique Géométrique.

Lorsqu'un pinceau de rayons incidents intercepte une surface S , il donne naissance à un pinceau de rayons réfléchis. Le principe de Fermat a permis de déterminer la direction de ces rayons réfléchis.

2.3.1. b Théorie géométrique de la Diffraction TGD ou GTD (en anglais)

La cohérence de cette théorie est fondée sur le fait que les rayons diffractés doivent obéir aux mêmes lois que la théorie de l'optique géométrique.

La théorie géométrique de la diffraction est chargée de fournir toutes les caractéristiques des rayons diffractés, en fonction de celles des rayons incidents et de la nature locale de la surface au point de diffraction.

Cette technique corrige les limites de l'optique géométrique en prenant en compte le phénomène de diffraction.

Pour bien comprendre comment la théorie géométrique de la diffraction mesure les champs électromagnétiques dans le cas d'une structure diffractant, on considère une onde plane tombe en incidence oblique sur un demi-plan parfaitement conducteur.

On distingue sur la figure 2.2, trois types de rayons : des rayons incidents, des rayons réfléchis, et des rayons diffractés.

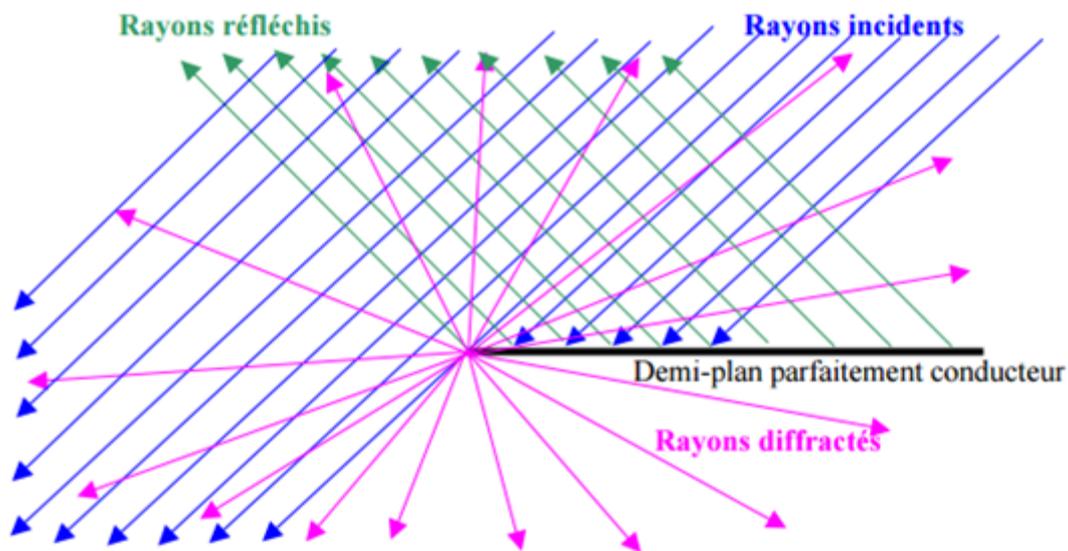


Figure2.2 Représentation des différents types de rayons générés par une structure

2.3.1. c Théorie Uniforme de la Diffraction : TUD ou UTD (en anglais)

L'une des faiblesses de la TGD est représentée par la divergence au voisinage des frontières optiques. Pour cela, la Théorie Uniforme de la Diffraction est mise au point pour rectifier ce problème. La TUD est uniformément valide au voisinage et sur les frontières de l'optique géométrique. En effet, la GO et la GTD ne prennent pas en considération les champs aux frontières ombre-lumière dans leurs calculs. Ces frontières se présentent comme des couches limitées à l'intérieur dans laquelle l'amplitude du champ varie rapidement.

La théorie uniforme de la diffraction (TUD) donne un champ total continu quel que soit la direction d'observation. Cependant, la TUD est une méthode de rayons, qui ne s'applique qu'à des arêtes de longueur infinie. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de fournir des résultats satisfaisants dans le Cas de géométries relativement simples [21].

2.3.1. c Synthèse sur les méthodes de rayons

Dans cette section nous avons présenté le principe des méthodes asymptotiques de rayons (OG,TGD,TUD), leurs avantages et inconvénients. La théorie géométrique de la diffraction (TGD) qui complète l'Optique Géométrique (OG), permet la modélisation de la diffraction d'une onde électromagnétique par une arête de longueur infinie. Cependant, le champ total diffracté par une cible présente des discontinuités, dans les

directions proches des frontières ombre lumière. Face à cette limite de la TGD, Pathak et Kouyoumjian [22] ont amélioré la théorie géométrique de la diffraction (TGD), et ils l'ont nommé théorie uniforme de la diffraction (TUD), cette méthode donne un champ total uniforme.

2.3.2 Méthodes orientées « courant » (OP, MCE, TPD)

Les méthodes asymptotiques de courants sont basées sur la détermination de courant induit sur la surface illuminée par une onde électromagnétique, ces méthodes sont utilisées pour l'étude de structures électriquement grandes.

2.3.2 .a Optique Physique (OP)

La théorie de l'optique physique est basée sur la réflexion des ondes planes sur une surface infinie parfaitement conductrice [23]. Par conséquent, la densité de courant sur la surface plane conductrice, en appliquant les conditions aux limites du champ magnétique tangential, est donnée par :

$$\vec{J}_s = \vec{n} \times \vec{H}_r \quad (2.3)$$

Où : \vec{J}_s est la densité de courant de surface
 \vec{H}_r est le champ magnétique tangential total sur la surface
 \vec{n} est un vecteur unitaire normal à la surface

Pour une onde incidente plane, le champ magnétique tangential est le double du champ magnétique tangential incident car la réflexion est totale sur une surface conductrice

($\vec{H}_i = \vec{H}_s$). On a donc :

$$\vec{J}_s = \vec{n} \times (\vec{H}_i + \vec{H}_s) = 2\vec{n} \times \vec{H}_i \quad (2.4)$$

Où \vec{H}_i est le vecteur du champ magnétique incident, \vec{H}_s est le vecteur du champ magnétique réfléchi et \vec{n} est le vecteur unitaire normal à la surface.

L'équation (2.4) est utilisée comme solution approximative pour le calcul de la densité de courant sur n'importe quelle surface localement lisse et parfaitement conductrice ayant des dimensions finies. On l'appelle : "l'approximation de l'optique physique", on suppose que le champ incident est un rayon et que la densité de courant existe seulement sur la partie illuminée de la surface de l'objet conducteur. La densité de courant est identiquement nulle sur la surface si aucun rayon ne frappe cette région.

Mathématiquement, on a donc :

$$\vec{J}_s = \begin{cases} 2 \vec{n} \times \vec{H}_i \\ 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

L'application de l'optique physique suppose trois hypothèses :

1. La longueur d'onde doit être courte par rapport aux dimensions de la cible et les amplitude des champs décroissent rapidement sur les surfaces qui ne sont pas directement illuminées par l'onde incidente.
2. Le rayon de courbure principale de la surface de la cible directement illuminée doit être significativement plus grand que la longueur d'onde.
3. La distance d'observation doit être très grande par rapport à la dimension de l'objet évalué.

Cette méthode est une approximation haute fréquences qui donne de bons résultats pour des cibles électriquement grandes et pour des incidences proches de la normale. Cependant, pour des angles d'incidence loin de la normale, les résultats sont erronés. Finalement, la simplicité de cette approche a rendu son utilisation omniprésente.

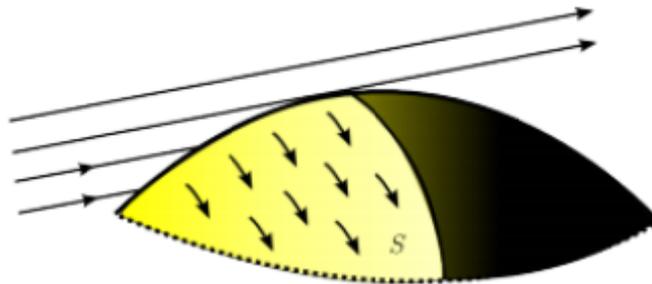


Figure 2.3 : Calcul du champ rayonné par l'OP

2.3.2. b Théorie Physique de la Diffraction TPD ou PTD (en anglais)

La méthode de la théorie physique de la diffraction (TPD) exprime le champ rayonné par un objet en fonction du rayonnement par les courants de surface sur l'objet [24].

Le courant total de surface est divisé en deux parties : une partie courant uniforme (ignorant les effets d'arête) et une partie courant non uniforme ou de frange (provenant des effets des bords). La partie uniforme du courant de surface est

simplement le courant donné par l'optique physique (OP). Le courant de frange est calculé en utilisant des méthodes asymptotiques.

On a donc l'équation suivante :

$$\vec{E}_{tot} = \vec{E}^i + \vec{E}_{PO}^r + \vec{E}^d \quad (2.6)$$

Où

- \vec{E}^i : le champ incident.

- \vec{E}_{PO}^r : le champ diffracté selon l'hypothèse de l'OP.

- l'OP : le champ diffracté selon l'hypothèse de l'OP.

- \vec{E}^d : un champ correcteur correspond à l'effet de diffraction induit par les discontinuités. Il y a plusieurs techniques qui permettent de formuler le champ correcteur E^d . La solution sert à exprimer ce champ sous la forme d'une intégrale linéique dont la bordure diffractant est le contour d'intégration. Parmi ces techniques, on peut citer :

- La méthode des courants équivalents (MCE).

- La théorie incrémentale de la diffraction (ITD). [20]

2.3.2. c Méthode des Courants Équivalents (MCE)

La Méthode des Courants Equivalents (MCE) a été proposée par Millar [25], à partir des travaux sur le rayonnement des ouvertures circulaires dans les années 50, en considérant que le champ rayonné par une arête vive pouvait être du à la contribution d'une ligne de courant distribuée le long de la ligne de discontinuité. Selon la Méthode des courants Equivalents (MCE), le champ diffracté par un dièdre est représenté par le rayonnement de courants équivalents linéiques, électrique et magnétique, distribués sur la discontinuité C du dièdre. La Méthode des Courants Equivalents (MCE), permet de résoudre les problèmes aux caustiques et les singularités des coefficients de diffraction. Elle est très utilisée pour modéliser la diffraction par les arêtes. La méthode des courants équivalentes fait partie des modèles retenus pour effectuer le calcul de la SER de cibles complexes.

2.3.3 Couplage des méthodes asymptotique

Chacune des méthodes asymptotiques mentionnées précédemment est adaptée à la modélisation d'un type de problème.

À fin de minimiser le coût de calcul et l'espace mémoire [26], plusieurs techniques d'accélération et d'optimisation ont été développées. Mais aucune méthode ne permet de calculer la SER des cibles complexes. Une solution sert à combiner certaines techniques, chacune analysant son domaine de prédiction. Il s'agit des méthodes hybrides.

Des techniques hybrides entre les méthodes asymptotiques existent et nommément entre les méthodes orientées « rayon » et celles orientées « courants ». À titre d'exemple, l'hybridation entre la technique PO/PTD avec la technique du lancer de rayons afin de déterminer la SER d'une cible.

Le principe consiste à associer les approximations de la PO et de la PTD avec l'algorithme du lancer de rayons. On décompose par un grand nombre de rayons la surface de cible et on applique la formulation PO/PTD pour l'estimation des courants qui prennent naissance sur la surface de l'objet.

Une autre méthode a été établie pour tenir compte les diffractions multiples d'une onde sphérique sur des obstacles métalliques, elle est basée sur les principes de la diffraction optique, physique et la UTD. Ces obstacles peuvent être sous des formes canoniques tels que des arêtes, des cylindres ou des coins. En effet, on évalue la diffraction simple à laquelle s'ajoute l'approximation de PO pour les multiples diffractions puisque l'utilisation de l'UTD est limitée dans les zones de transition. On peut désigner également un couplage entre la PO/PTD et la GO pour calculer la SER d'une cible radar.

2.4 Les méthodes de lancer et tracé de rayons :

La construction de trajets des rayons entre la source et le récepteur est une étape très utile pour l'implémentation de modèles basés sur les approches géométriques comme L'OG, la GTD ou l'UTD par exemple. Ces méthodes sont typiquement les plus utilisées pour modéliser les interactions électromagnétiques dans un canal de propagation comportant de nombreux objets.

On peut citer deux approches de ces méthodes :

- Le lancer de rayons : est une méthode qui utilise les lois de l'optique géométrique. Elle consiste à suivre le trajet inverse des rayons lumineux afin de calculer les propriétés géométriques et lumineuses de la scène.
- Le tracé de rayons : La méthode de base utilise le fait que dans un milieu homogène, le déplacement des rayons lumineux se fait en ligne droite.

2.4.1 Le lancer de rayons

La figure 2.5 illustre le principe du lancer de rayons.

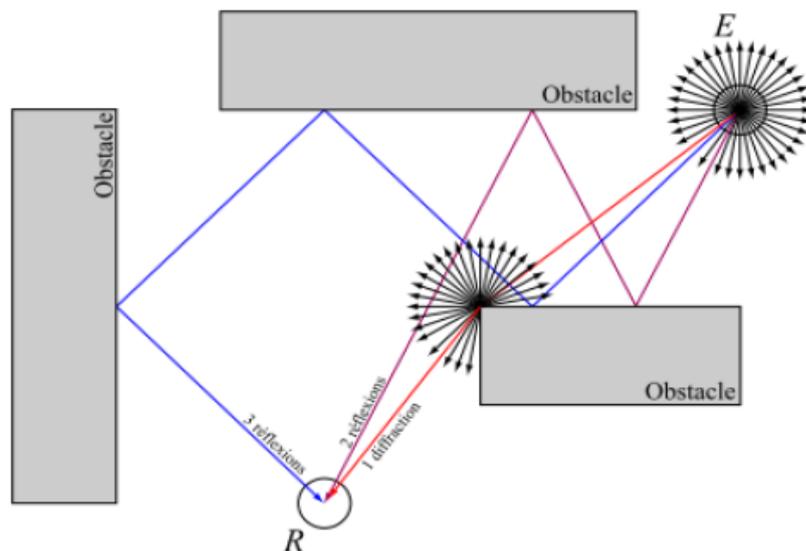


Figure 2.4 Principe du lancer de rayons

Le suivi inverse d'un rayon nous permet de connaître ce qui est vu dans une direction donnée (la direction de ce rayon) à partir d'une position d'observation (l'origine du rayon) Afin de balayer la scène étudiée, les rayons sont lancés à un pas angulaire sur toute la face diagramme de rayonnement d'antenne d'émission. On conserve les rayons arrivants au récepteur en fonction du nombre d'interactions avec les objets de la scène. L'avantage de cette technique réside dans la rapidité de l'algorithme si le nombre de rayons lancé est contrôlé. Cependant, cette façon brute va très probablement générer des rayons en excès dans le domaine de calcul qui ne seront jamais incidents sur les objets de la scène, et il est donc un inconvénient en termes de ressources de calcul. De plus, le pas angulaire choisi pour le lancer de rayons est un

facteur très important pour la précision de la recherche des trajets. Ainsi, le lancer de rayons n'est pas très adapté à la modélisation des interactions onde/structure dans des scènes complexes.

2.4.2 Le tracé de rayons

Le tracé de rayons se comporte comme la méthode de la « force brutale » ; il prend en compte de nombreux phénomènes optiques, puisqu'il imite la nature (ou plutôt un modèle physique de la nature) en suivant à l'envers les rayons lumineux. D'où le réalisme des images qu'il produit.

Le tracé de rayons est une méthode extrêmement simple basée sur le principe de Fermat pour les diffractions. La figure (2.5) montre ce principe. Les seuls calculs géométriques nécessaires sont ceux de l'intersection entre une demi-droite et un objet.

Contrairement au lancer de rayons, l'avantage du tracé de rayons est d'être une méthode exacte. En fait, la recherche des trajets est rigoureuse en fonction du nombre d'interactions dans la scène, il n'y a donc pas de risque d'explosion du nombre de rayons. Cependant, l'algorithme peut entraîner une expansion des temps de calcul.

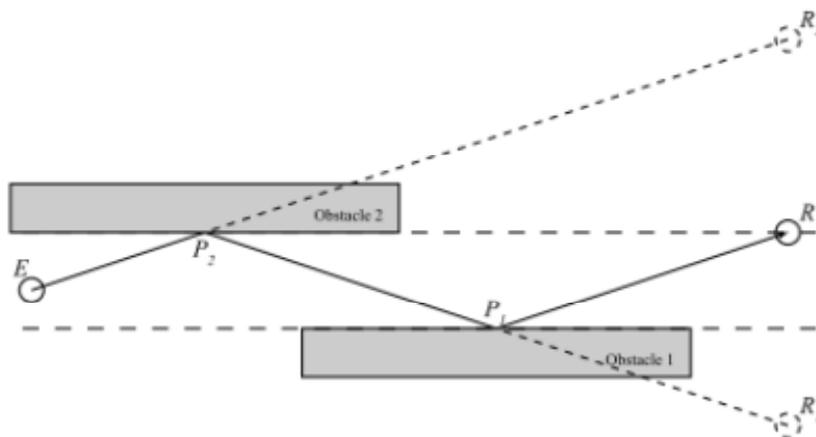


Figure 2.5 Principe du tracé de rayons.

À noter que la technique du tracé de rayons est plus performante par rapport au lancer de rayons du point de vue précision et temps de calcul

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux familles de méthodes de calcul de champ diffusé par une scène arbitraire.

Nous avons également abordé les possibilités de combinaison entre les différentes méthodes asymptotiques selon le besoin de modélisation et les phénomènes de dispersion à prendre en compte. Le chapitre s'est terminé par une introduction sur les techniques technique de lancer de rayon et de tracer de rayon qui sont utilisé avec les méthodes asymptotiques afin d'optimiser et affiner les résultats de simulation.

Chapitre 3 Résultats de simulations

3.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les différentes méthodes utilisées dans l'estimation du champ diffusé par une cible quelconque.

Ce chapitre est consacré à l'implémentation de modèle développé dans ce travail de projet de fin d'étude.

3.2 Problématique et Méthodologie

Nous avons abordé brièvement dans la partie précédente la problématique de calcul du champ diffusé par une cible de forme complexe, ainsi nous avons cité deux approches pour le calcul de la SER de cibles de forme quelconque à savoir la méthode des composants géométrique (ensemble de forme canoniques, constituant la cible) et l'approche du maillage triangulaire surfacique de la cible.

Dans notre travail, nous avons opté pour l'approche du maillage triangulaire puisqu'elle présente l'avantage de ramener le problème de calcul du champ diffusé par la cible au calcul de la diffusion par un seul type de géométrie (triangle).

Le point de départ de développement de notre modèle de calcul sur MATLAB, est le logiciel POFACET développé sous MATLAB à l'école naval de Monterey en 2004 [27].

3.3 Modèle géométrique d'une cible complexe

La plupart des simulateurs de calcul électromagnétiques présents dans la littérature X Patch, FEKO, FERMAT, POFACETS utilisent de manière systématique la conception assistée par l'ordinateur pour concevoir des objets complexes. Dans ce travail, nous avons choisi de modéliser la cible par un ensemble de facettes triangulaires.

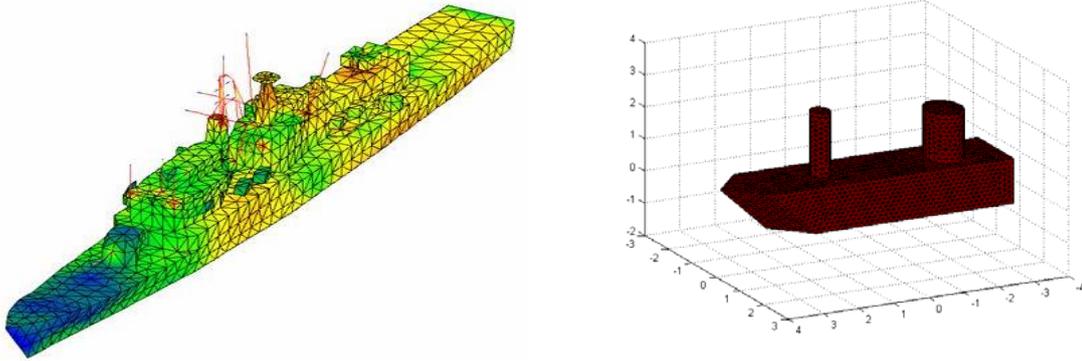


Figure 3.1 Modèle Géométrique d'une cible complexe

3.3.1 Effets d'ombrage

L'observation des effets d'ombrage est introduite pour éliminer les effets des facettes non pertinentes à la diffusion. Ainsi, il faut identifier les facettes (triangles) de la scène qui sont visibles par l'émetteur et le récepteur à chaque moment de l'acquisition.

3.3.2 Test de visibilité

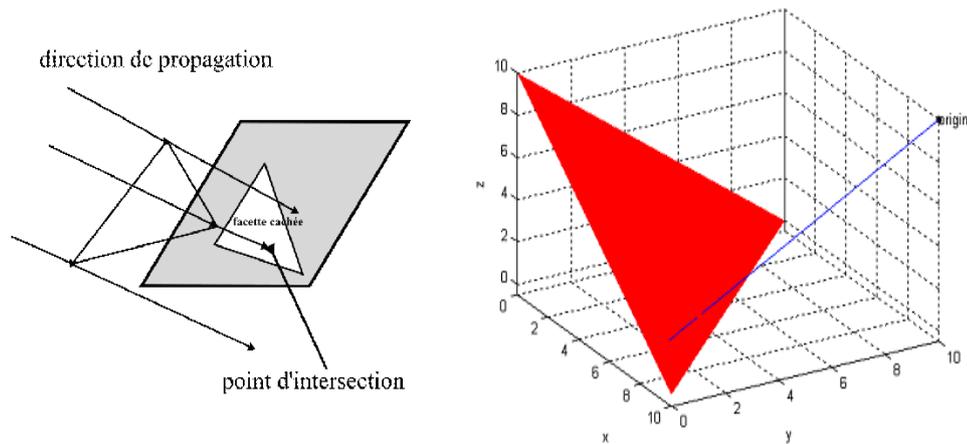
Lorsqu'une cible intercepte une onde électromagnétique, il y a des parties de sa surface qui sont éclairées alors que le reste est sombre selon l'angle d'illumination, certaines parties sont cachées par d'autres parties de la cible. L'approximation de l'optique physique consiste à éliminer les contributions des régions ombrées dans le calcul de la SER.

Le software POFACET utilise un simple test d'illumination. Ce test a été appliqué à chaque facette triangulaire qui permet de savoir si cette facette est éclairée ou non. Le test consiste à calculer le produit scalaire entre le vecteur unitaire normal à la facette et le vecteur de l'onde incidente. Si le produit scalaire est supérieur à 0, alors cette facette triangulaire est dite éclairée et sa contribution est ajoutée au champ total diffusé. Sinon, la contribution de ce triangle est éliminée.

Dans le cas de développement de notre modèle, nous considérons un modèle arbitraire d'une cible complexe discrétisée en facettes triangulaires, dont nous connaissons les coordonnées de sommets de chaque facette dans le repère global. On calcule les vecteurs normaux à chaque facette et on nettoie les arêtes artificielles provenant du maillage triangulaire, ensuite, nous utilisons le test de visibilité pour déterminer les facettes orientées vers le radar. Les facettes cachées par d'autres facettes sont déterminées par l'algorithme du peintre [28].

3.3.3 Principe de l'algorithme du peintre

Au début du processus, la première facette est considérée et toutes les autres sont testées pour vérifier si cette facette pointée est ombrée par d'autres ou pas. Un rayon, passant par un certain point de la première facette et dans la direction de propagation, est définie. L'idée principale est basée sur le principe d'intersection entre un rayon et un triangle. La situation est illustrée dans la figure 3.2



(a) Visibilité d'une facette

(b) Intersection rayon triangle

Figure 3.2 Principe de test de visibilité

Pour une position donnée de l'émetteur, une par une, chaque facette triangulaire est testée, en utilisant le même triangle pris initialement. Les facettes illuminées sont enregistrées dans un tableau. En calculant la distance à partir de chaque facette cachée au point d'observation, la facette la plus proche sera illuminée et les autres seront des facettes cachées (non illuminées). De cette façon, l'imprécision dans le calcul de la SER en raison de l'effet d'ombrage est réduite au minimum.

Ce test utilise la normale de chaque facette de l'objet. Si l'angle entre cette normale et le vecteur allant d'un point de la facette jusqu'au récepteur est inférieur à 90 degrés, si non la facette n'est pas illuminée. Pour implémenter cet algorithme, nous avons accompli les tâches suivantes :

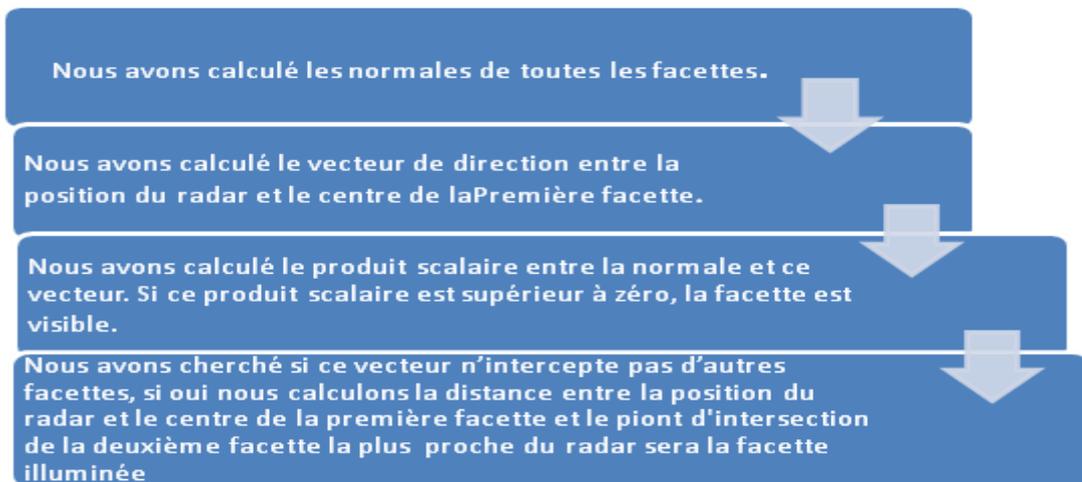


Figure 3. 3 Algorithme du peintre

L'application de ce test de visibilité est réalisée pour la cible représentée sur la figure 3.1 et pour une position du radar définie par $(\theta, \phi) = (45^\circ, 45^\circ)$. Le résultat obtenu est illustré par la figure 3.4

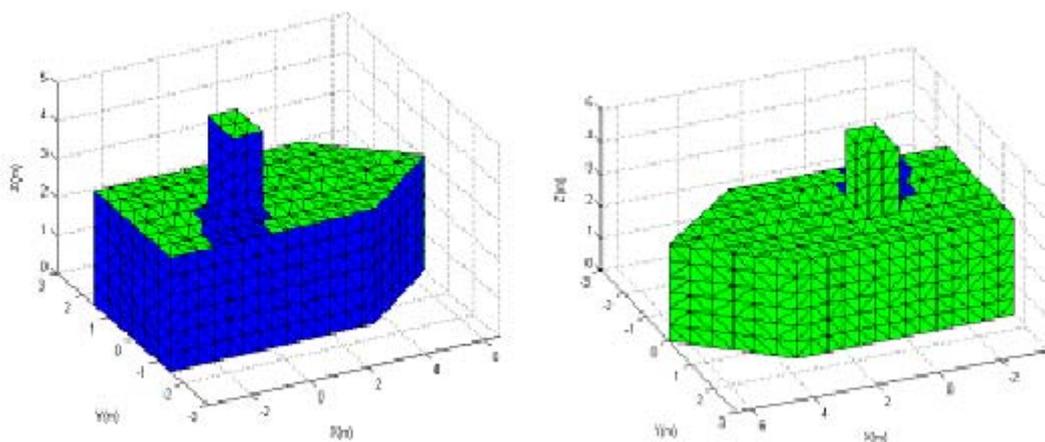


Figure 3.4 Test de visibilité pour $(\theta, \phi) = (45^\circ, 45^\circ)$.

3.4 Méthodes asymptotiques retenues

Nous avons présenté dans le précédent chapitre une étude qui nous a permis de connaître les différentes méthodes généralement utilisées pour le calcul du champ électromagnétique diffusé par un objet de forme arbitraire.

Dans l'objectif d'exprimer le champ réfléchi ou diffusé par une surface d'un objet complexe, nous avons opté pour les méthodes asymptotiques, ces méthodes

s'appuient sur les solutions données par les équations de Maxwell, dont nous utilisons le développement asymptotique aux premiers ordres en hautes fréquences. Elles sont typiquement valables pour des objets dont les dimensions sont grandes devant la longueur d'onde λ . L'Optique Géométrique (OG) est adoptée dans notre stratégie de calcul pour la modélisation des réflexions multiples entre les facettes. Nous présentons dans ce qui suit l'application de l'OG à ces fins, notamment la détermination de la direction spéculaire qui permet par la suite le calcul exacte des surfaces qui contribuent aux doubles réflexions. Ensuite, nous passons à la formulation générale de l'Optique Physique (OP) ainsi que son application à une facette triangulaire.

3.4.1 Application de l'optique géométrique (OG)

Nous commençons le développement de notre modèle de calcul, en supposant que le radar est situé en champ lointain de la cible. Par conséquent, le champ électrique incident peut être considéré comme une onde plane, comme indiqué ci-dessous :

$$\vec{E}(\vec{r}) = (E_{\theta}\vec{\theta}_i + E_{\varphi}\vec{\varphi}_i).e^{-j\vec{k}_i.\vec{r}} \quad (3.3)[3]$$

Où E_{θ} et E_{φ} correspondent aux composantes verticale et horizontale de polarisation du champ incident et le vecteur d'onde incident \vec{k}_i donné par :

$$\vec{k}_i = k (\sin\theta_i \cos\varphi_i. \vec{x} + \sin\theta_i \sin\varphi_i. \vec{y} + \cos\theta_i. \vec{z}) \quad (3.4)[3]$$

Où $k = \frac{2\pi f}{c}$ est le nombre d'onde.

Lorsqu'un rayon incident frappe une surface, il donne naissance à un rayon réfléchi dont la direction est déterminée par les lois de Snell-Descartes (direction spéculaire), pour les surfaces parfaitement conductrices, le champ réfléchi en un point quelconque dans la direction spéculaire est donné par la relation suivante :

$$\vec{E}_r = -\vec{E}_{inc} + 2(\vec{n}.\vec{k}_i)\vec{n} \quad (3.5)$$

Où \vec{E}_{inc} est le champ incident et \vec{n} la normale de la facette.

3.4.2 Application de l'optique physique (OP)

L'optique physique est adoptée pour le calcul du champ diffusé par simple réflexion, ainsi que pour la dernière réflexion dans le cas de la prise en compte des réflexions multiples.

La diffusion d'une facette triangulaire est un cas particulier de la diffusion d'un corps arbitraire. Par conséquent, la formule utilisée pour calculer le champ diffusé par une facette triangulaire sera dérivée de celui obtenu pour un objet quelconque. On considère la situation représentée sur la figure 3.5.

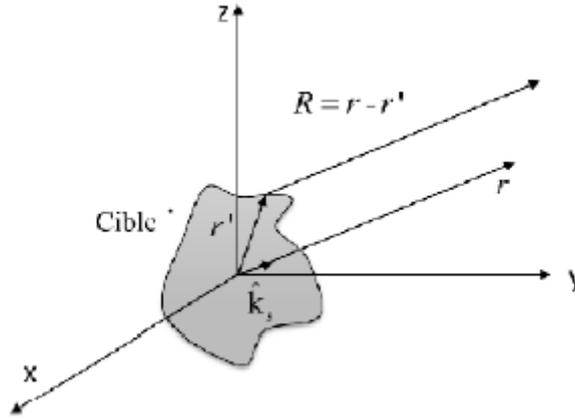


Figure3.5 Diffusion par un objet arbitraire en champ lointain

Une cible arbitraire est placée à l'origine et un point d'observation (x,y,z) en champ lointain. L'optique physique est basée sur le courant surfacique induit sur la surface illuminée par une onde électromagnétique et la densité de courant est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique incident, alors qu'elle est considérée comme nulle dans les zones d'ombre (surface non éclairée). Par conséquent :

$$\vec{J}_s = \begin{cases} 2\vec{n}(\vec{r}) \times \vec{H}_i(\vec{r}) & \text{pour la surface illuminée} \\ 0 & \text{pour la surface ombrée} \end{cases} \quad (3.6)$$

On considère le potentiel vecteur magnétique A en fonction de la densité de courant surfacique \vec{J}_s , il est donné par [29]:

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \iint_{S'} J_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (3.7)$$

Où μ est la perméabilité du milieu, R est la distance entre un élément de courant et le point d'observation S' et est la surface illuminée.

Dans le cas de l'approximation en champ lointain, l'expression du champ rayonné en fonction du potentiel A est simplifiée sous la forme suivante :

$$E_{S \cong} = -j\omega A \quad (3.8)$$

Les vecteurs \mathbf{r} et \mathbf{R} sont à peu près parallèles dans l'approximation du champ lointain où \mathbf{R} est le vecteur entre le point d'observation et un élément de surface et \mathbf{r} ; le

vecteur position du point d'observation. Alors, la distance R peut s'écrire sous la forme suivante [28] :

$$R = |R| = |r - r'| \quad (3.9)$$

r' le vecteur position d'un élément de surface est défini par :

$$r' = x'\vec{x} + y'\vec{y} + z'\vec{z} \quad (3.10)$$

Le vecteur unitaire de la direction de propagation \vec{k} peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\vec{k}_s = u\vec{x} + v\vec{y} + w\vec{z} \quad (3.11)$$

Avec :

$$u = \sin\theta\cos\varphi ; v = \sin\theta\sin\varphi ; w = \cos\theta$$

À partir de (3.6), (3.7) et (3.8) dans (3.9), on peut écrire le champ rayonné sous la forme suivante :

$$E_S^{OP} \cong \frac{j\omega k}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \iint_{S'} J_S(r) e^{jk_s \vec{k}_s \cdot r'} ds' \quad (3.12)$$

[5]

En champ lointain, la composante radiale du champ rayonné est supposée nulle, donc on peut réécrire l'équation d'une façon plus formelle et trouver l'expression de la littérature [29] :

$$E_S^{OP} \cong \frac{jkz}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \iint_{S'} J_S(J_s \cdot \vec{k}_s) \vec{k}_s e^{jk_s \vec{k}_s \cdot r'} ds' \quad (3.13)$$

[5]

Où $z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \times z_0$ est l'impédance intrinsèque du milieu.

D'après (3.7) on peut exprimer la densité de courant de surface J_S en fonction du champ électrique incident E_i , Z ainsi que le vecteur de propagation incident \vec{k}_i :

$$J_S = \frac{1}{Z} \vec{n} \times (E_{i\varphi} \cdot \vec{\varphi} - E_{i\theta} \cdot \vec{\theta}) e^{j\vec{k}_i \cdot r'} \quad (3.14)$$

Car

$$\vec{H}_i = \frac{1}{Z} \vec{k}_i \times \vec{E}_i = \frac{1}{Z} (E_{i\varphi} \vec{\varphi} - E_{i\theta} \cdot \vec{\theta}) e^{j\vec{k}_i \cdot r} \quad (3.15)$$

En insérant (3.11) dans (3.7), l'expression du champ rayonné devient :

$$E_S^{OP}(x, y, z) = \frac{j}{\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{n} \times (E_{i\varphi} \cdot \vec{\varphi} - E_{i\theta} \cdot \vec{\theta}) \iint_{S'} e^{-jk(\vec{k}_i - \vec{k}_s) \cdot r'} ds' \quad (3.16)$$

L'intégrale double dans l'expression (3.16) est calculée en Annexe C.

3.5 Résultats de simulation

Nous avons effectué quelques simulations sur des cibles canoniques, à savoir la plaque rectangulaire pour le phénomène de réflexion spéculaire, ainsi que le dièdre pour le phénomène de double réflexion. Un autre volet aussi important a été traité dans cette partie qui est le temps de calcul. Nous commençons cette partie par présenter les caractéristiques de la machine utilisée dans les simulations réalisées puis nous présentons quelques simulations.

3.5.1 Caractéristiques techniques de l'outil utilisée dans la simulation

L'outil que nous avons utilisée dans notre simulation est un ordinateur fixe avec Windows 8.1 (64 bits) comme système d'exploitation. Equipé d'un microprocesseur de type core (TM) i7 et d'une fréquence de processeur de 3.6 GHz, ainsi qu'une mémoire physique(RAM) totale est de 8 Go.

3.5.2 SER d'une plaque carrée

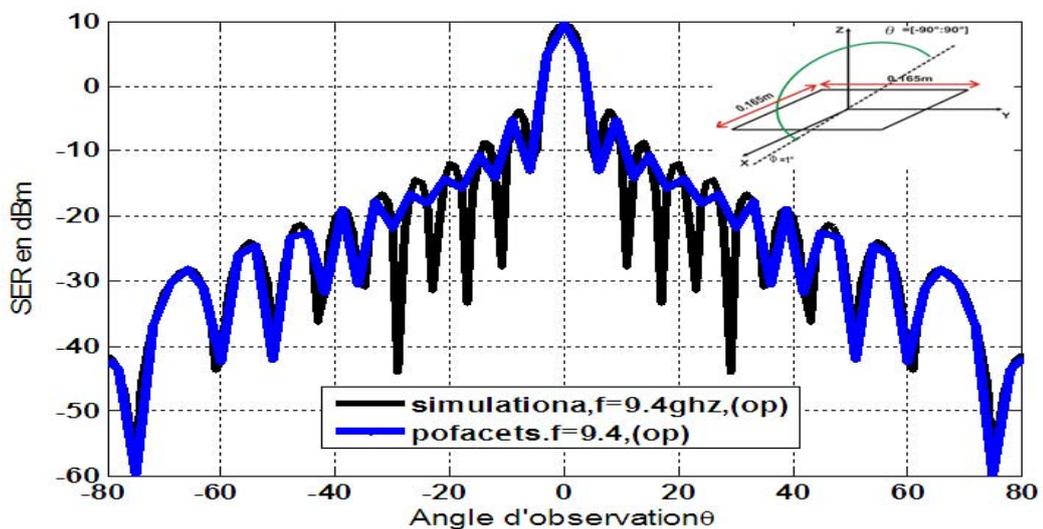


Figure 3.6 Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation

La figure 3.6 représente les variations de la SER d'une plaque carrée de dimensions $a=b= 0.165\text{m}$ (ce qui fait à peu près $5,2\lambda$). La géométrie de l'observation est

représentée sur la même figure pour $\varphi = 1^\circ$, et $\theta = [-90^\circ : 90^\circ]$ et une fréquence $f = 9.4$ GHz).

Le résultat montre aussi une comparaison entre le résultat obtenue par Pofacets (courbe bleu) et le résultat obtenu par notre approche de calcul en noir. Pour une incidence normale, la SER prend une valeur maximale de 10dB, ce qui est en parfait accord avec le phénomène modélisé et pris en compte pour la plaque qui est la réflexion spéculaire. Le résultat présenté sur cette figure est en parfait accord avec celui obtenu par Pofacets.

3.5.3 Temps de calcul de la SER d'une plaque carrée

L'objectif de cette simulation est d'étudier l'impact de nombre de facettes triangulaires sur le temps de calcul. Nous avons calculé la SER d'une plaque carré modélisée avec 2 triangles, 4 triangles et 322 triangles, comme le montre la figure 3.8.

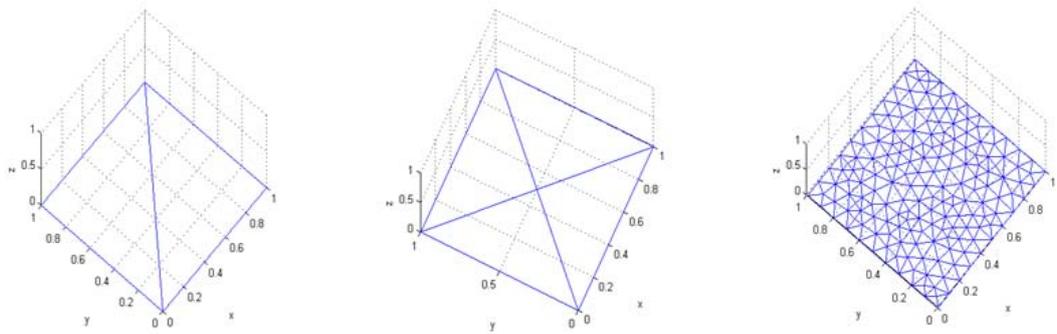


Figure 3.7 Modèle géométrique de la plaque carrée

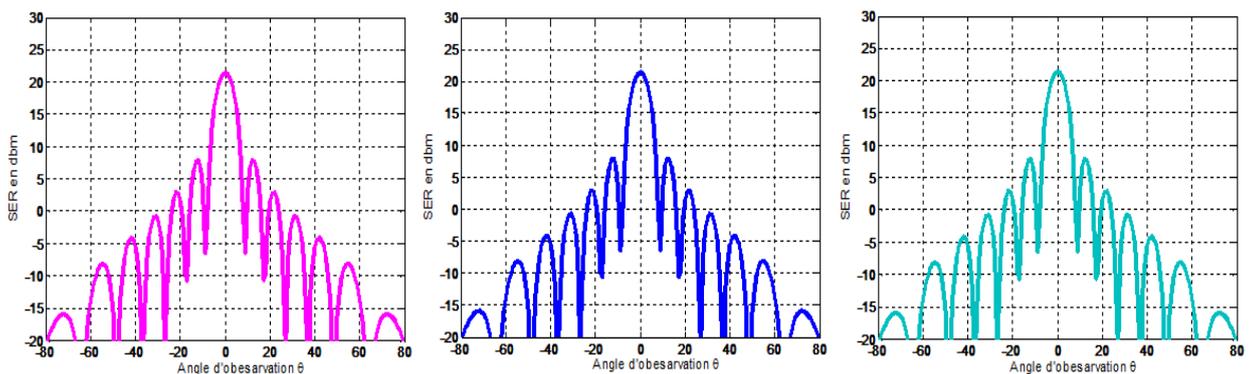


Figure3.8 Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation

Les figures (3.8) représente les variations de la SER de la plaque carrée (1m de coté) à une fréquence de 1GHz et pour un angle d'observation variant de -90° à 90° .

Le niveau de SER maximale de la plaque, éclairée par une onde plane, est de 21 dBm.

Les résultats sont comparés avec les résultats publiés dans la littérature [30].

Analyse de la plaque carrée	Le nombre de facettes triangulaire	Temps de simulation (s)
Courbe Rose	2	0.335
Courbe Bleu	4	0.557
Courbe Verte	322	722.635

Tableau3.1 Temps de calcul de la SER d'une plaque carrée

Nous constatons que lorsque le nombre de facettes triangulaires augmente, le temps de calcul augmente. La valeur de la SER est indépendante du nombre de facettes triangulaires.

3.5.4 SER d'une plaque carrée

La figure 3.9 représente les variations de la SER d'une plaque carrée de côté 0.36m à une fréquence de 10 GHz et l'angle d'observation $\theta = [0^\circ : 180^\circ]$. La figure présente une comparaison entre le résultat obtenu par pofacets (courbe bleu) et le résultat obtenu par notre simulation (courbe magenta), le résultat obtenu est en très bon accord avec celui publié dans la référence [31].

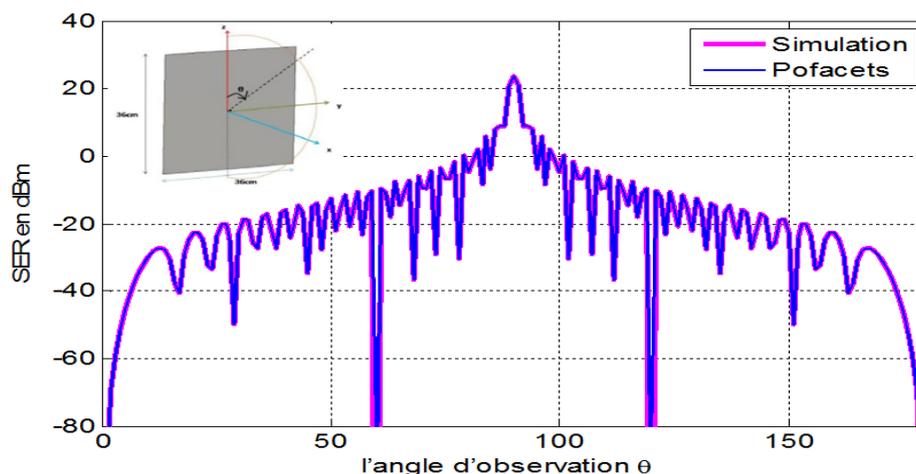


Figure 3.9 Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation

3.5.5 SER d'un dièdre parfaitement conducteur

Afin de d'étudier la contribution du double réflexion, nous avons calculé la SER d'un dièdre parfaitement conducteur de coté 0.18 cm à une fréquence de 10 GHz.

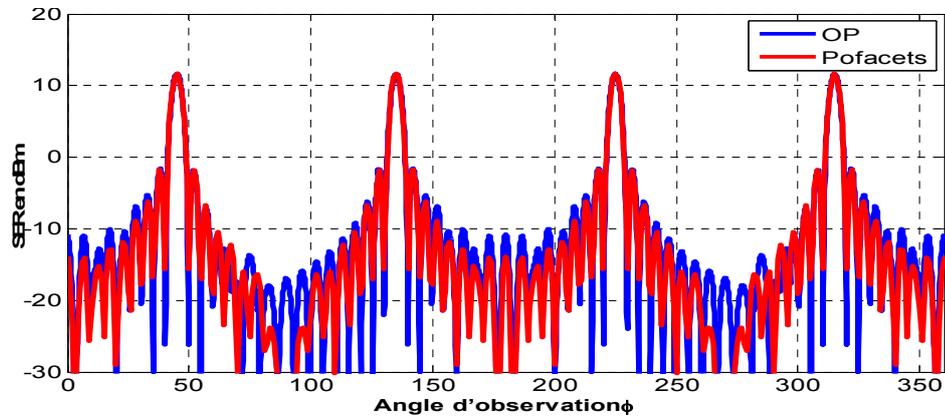


Figure 3.10 Variation de la SER en fonction de l'angle d'observation

La figure 3.10 représente les variations de la SER avec prise en compte uniquement de la contribution par simple réflexion du dièdre et pour la position du radar donnée par $\theta = 90^\circ$, et $\varphi = [0^\circ : 360^\circ]$. Le résultat montre aussi une comparaison entre le résultat obtenu par pofacets (courbe rouge) et le résultat obtenu par notre simulation (courbe bleu).

Nous avons refait la simulation avec prise en compte pour montrer la contribution de double réflexion du même dièdre, ainsi que pour étudier l'impact de nombre de facettes triangulaires utilisées sur le temps de calcul, nous avons réalisé deux simulations, la première en utilisant un dièdre composé de quatre facettes triangulaire et la seconde en utilisant 64 facettes triangulaires comme le montre la figure 3.12.

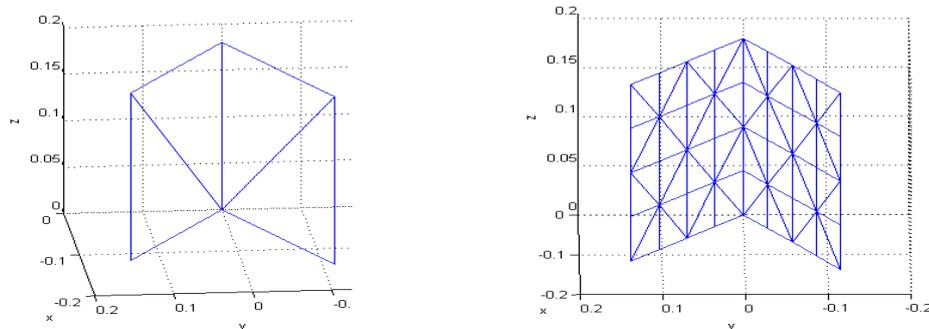


Figure 3.11 Modèle géométrique du dièdre

La figure 3.12 présente les variations de la SER mono-statique du dièdre. Nous remarquons que la contribution des interactions multiples n'a lieu que lorsque le radar (l'émetteur) voit les deux faces intérieures du dièdre. Le résultat montre aussi une comparaison entre la contribution des doubles réflexions (DR) (courbe en rouge pour un dièdre de 4 triangles et courbe en bleu pour un dièdre 64 (triangles) et celui de la simple réflexion (courbe en vert).

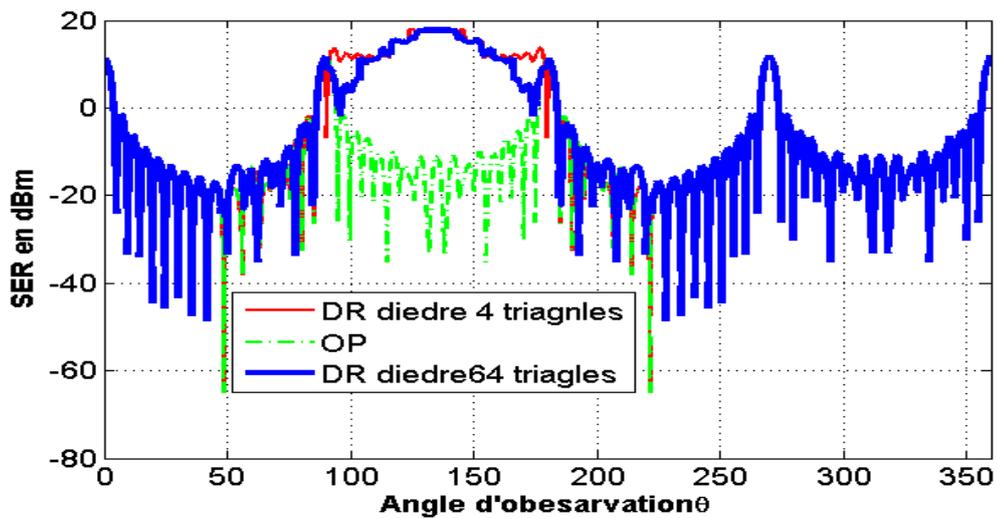


Figure 3.12 SER mono-statique d'un dièdre parfaitement conducteur

Analyse de dièdre	Le nombre de facettes triangulaire	Le temps de calcul
Courbe rouge	4	36.37s
Courbe bleu	64	5h

Tableau3.2 Temps de calcul pour le dièdre

Nous constatons que lorsque le nombre de facettes triangulaires est important, le temps de calcul augmente. Ainsi, dans le cas du dièdre, la valeur de la SER est influencé par le nombre de facettes triangulaires constituant le dièdre et ce uniquement sur la partie double réflexion.

3.5.6. SER d'un dièdre

Dans cette simulation, nous avons repris le même dièdre précédent, mais nous avons changé l'orientation pour pouvoir comparer notre résultat avec celui publié dans la référence [31]. Ainsi que nous avons réalisé une comparaison entre la SER d'un dièdre composé de 4 triangles, puis le même mais composé de 64 triangles et enfin un autre constitué de 216 facettes triangulaire (figure 3.13).

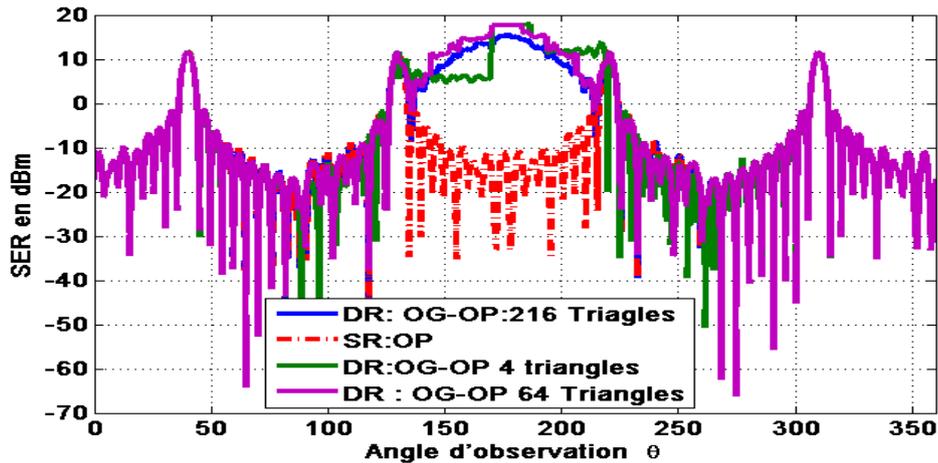


Figure 3.13 SER mono-statique d'un dièdre parfaitement conducteur à 10 GHz

Analyse de dièdre	Le nombre de facettes triangulaire	Le temps de calcul
Courbe verte	4	36.37s
Courbe move	64	4h
Courbe bleu	216	15h

Tableau 3.3 Temps de calcul pour le dièdre

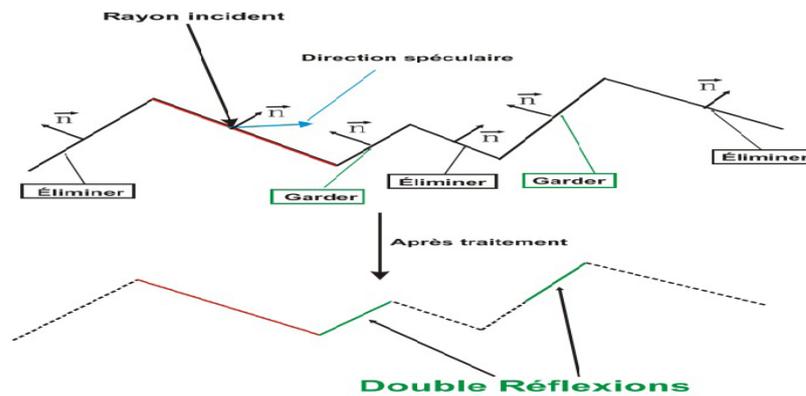
Les résultats que nous avons présentés sont obtenus avec la prise en compte de la double réflexion en utilisant l'intersection entre un triangle et un rayon, et nous avons constaté que pour affiner les courbes de la SER obtenue, il fallait augmenter le nombre le nombre de facettes triangulaire dans le modèle de la cible (dièdre dans ce cas),

l'augmentation de nombre de facettes triangulaires implique une augmentation dans le temps de calcul comme le présente la tableau 3.3.

Dans le but d'optimiser le modèle de calcul développé pour la prise ne compte des phénomènes de double réflexion, nous avons adopté la démarche décrite dans la section suivante.

3.6 Détermination des facettes candidates à la double réflexion

La détermination des facettes candidates à la double réflexion est une étape primordiale pour modéliser les réflexions multiples, elle consiste à solliciter les facettes sur le quelles on applique notre calcul en effectuant le produit scalaire entre le vecteur de la direction d'incidence et la normale à la facette en coordonnées locales comme illustré sur la figure 3.14.



Figuer3.14 Sélection des facettes candidates à une double réflexion

3.7 Projection spéculaire et subdivision linéaire

Après l'étape de sélection des facettes candidates à la double réflexion, vient l'étape de projection de la facette illuminée par l'onde incidente sur la facette candidate à une double réflexion suivant la direction spéculaire déterminée par l'optique géométrique.

$$\vec{k}_{sp} = \vec{k}_i - 2(\vec{n} \cdot \vec{k}_i)\vec{n} \quad (3.17)$$

\vec{k}_{sp} : Le vecteur d'onde incident

\vec{k}_i : La direction de réflexion spéculaire

\vec{n} : La normale de la facette

Pour la dernière réflexion, on applique l'optique physique sur la surface d'intersection entre

La projection réalisée et la facette candidate. Cette surface est déterminée par la technique de subdivision linéaire. La situation globale est illustrée sur la figure 3.15.

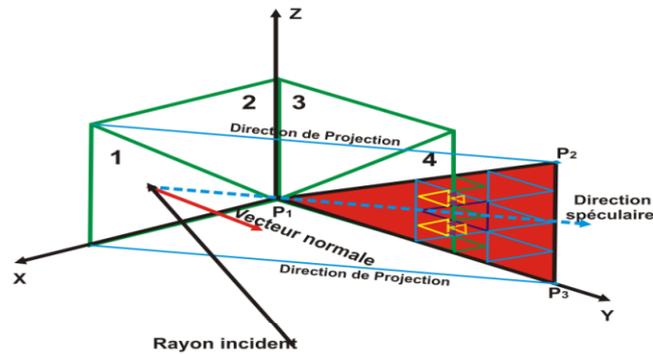


Figure 3.15 Projection spéculaire et subdivision linéaire

°°surfaces triangulaires jusqu'à la vérification du test d'arrêt de subdivision. Ce test est déclaré vérifié lorsque les trois sommets d'une facette triangulaire sont en dehors de la facette candidate et l'aire est inférieure à $\lambda / 10$. La figure 3.16 illustre l'algorithme de subdivision d'une facette triangulaire [32].

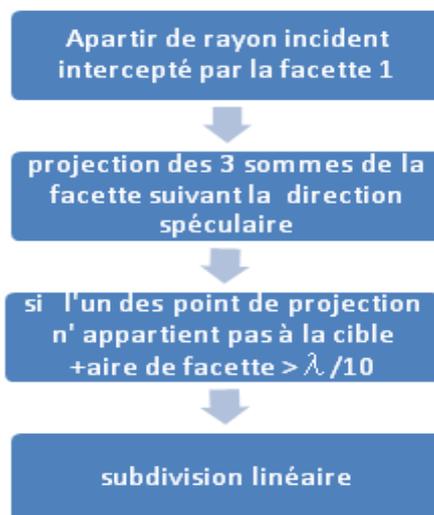


Figure 3.16 Algorithme de subdivision linéaire.

3.8 Algorithme général de calcul

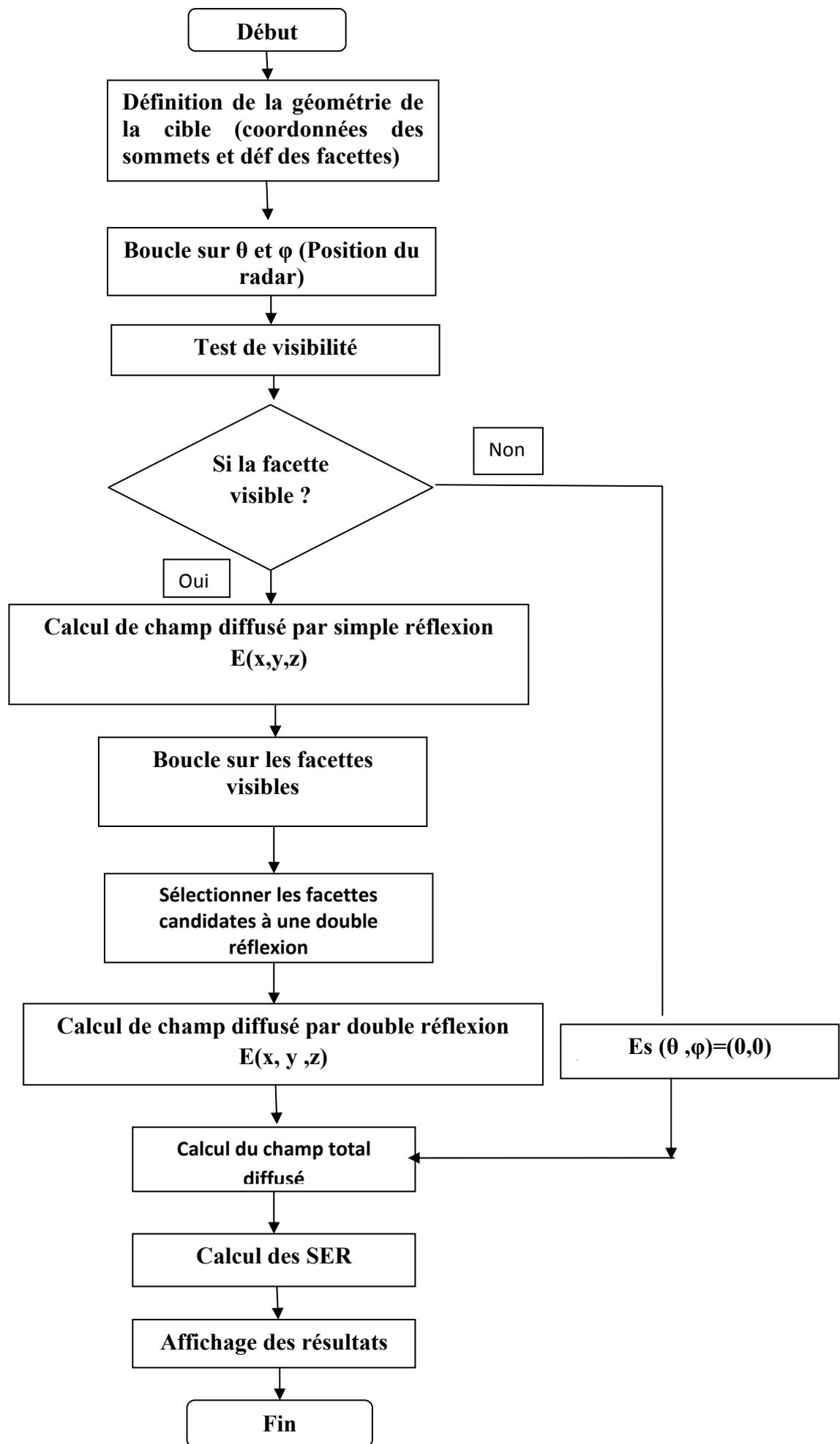


Figure 3.17 Algorithme général de calcul

3.9 SER dièdre

Dans l'objectif de montrer la réduction du temps de calcul avec la technique de projection de la première facette éclairée suivant la direction spéculaire et de procéder par la suite à une subdivision linéaire pour prendre en compte la surface réellement éclairée. Nous avons repris le dièdre précédent avec seulement 4 facettes triangulaires. Le résultat obtenu montre que la technique utilisée est très efficace, en terme de réduction de temps de calcul comme le montre le tableau 3.4, ainsi qu'entre de niveau de SER.

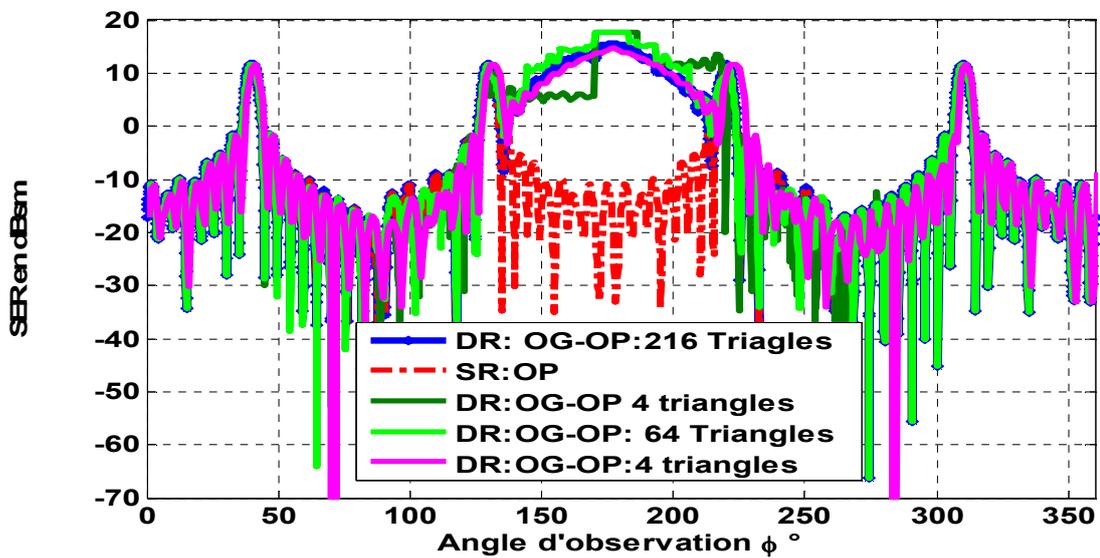


Figure 3.18 SER mono-statique d'un dièdre parfaitement conducteur

Analyse de dièdre	Le nombre de triangles	Le temps de calculs
Courbe Rose	4	5 min

Tableau 3.4 Temps de calcul pour le dièdre configuration 3

3.10 SER d'un bateau en modèle générique

La figure 3.19, représente un modèle de bateau générique de 10 m de longueur (x-direction) et de 3m de longueur (y-direction) et de 2 m hauteur (z-direction).

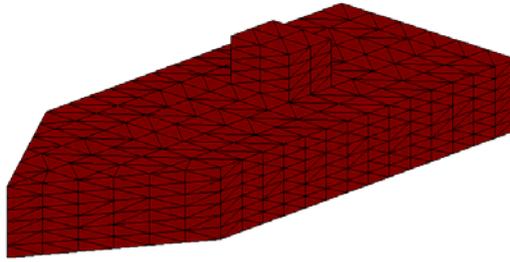


Figure 3.19 Modèle générique d'un bateau

La figure 3.19 représente la SER mono-statique de modèle de bateau présenté dans la figure 3.18. Nous observons la contribution de réflexion du second ordre pour θ varie de -90 à 90 .

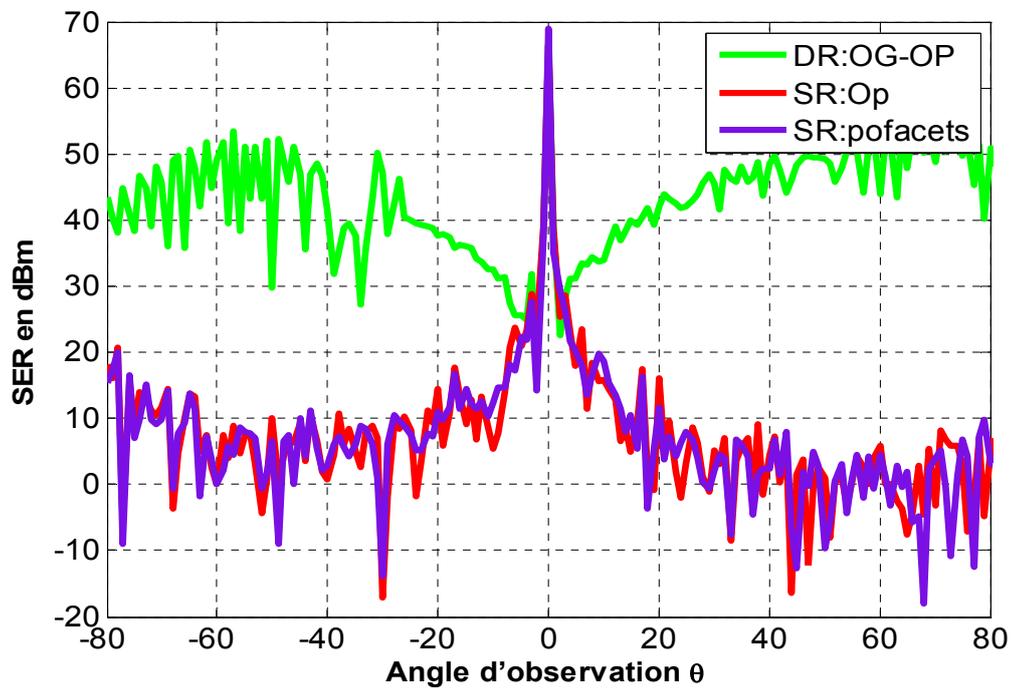


Figure 3.20 SER d'un bateau en modèle générique configuration 1

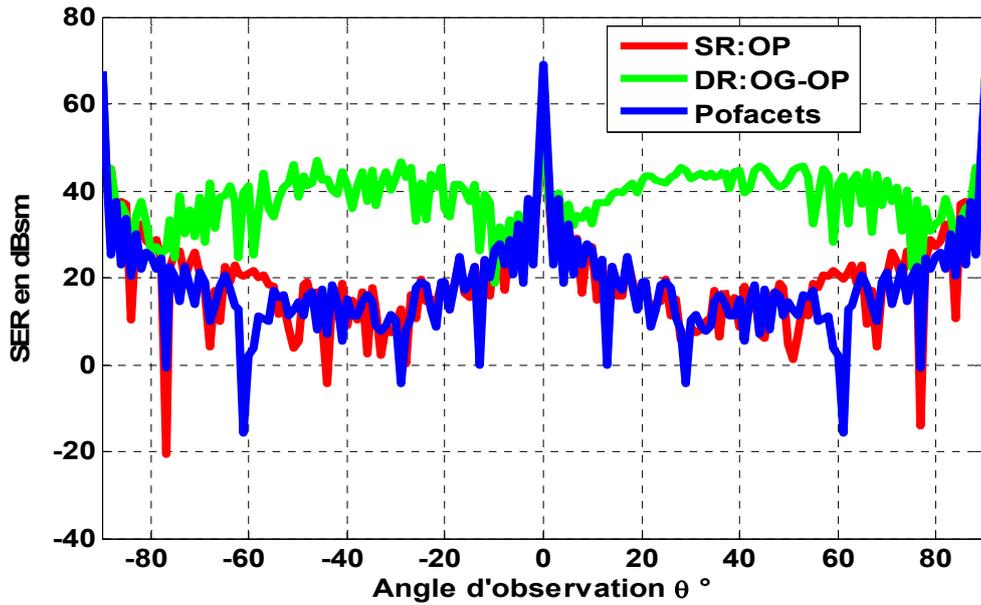


Figure 3.21 SER d'un bateau en modèle générique configuration 2

La figure 3.20 représente la SER mono-statique de même avec une observation dans le plan formé par $\phi=90^\circ$ et θ varie de -90 à 90 . Nous observons la contribution de réflexion du second ordre pour θ allant de 10° au 80° ainsi que pour -80° jusqu'au -10° . Le résultat a été validé par une comparaison par rapport à celui obtenu par pofacets courbe en bleu dans le cas de simple réflexion.

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la démarche adoptée pour concevoir notre algorithme de calcul de SER d'objets canoniques et complexes qui est basé sur la combinaison de l'optique physique et l'optique géométrique (OG-OP). Une première méthode consiste à suivre le chemin de rayon incident pour déterminer les facettes contribuant à une double réflexion, cette technique à donnée des résultats plus au moins satisfaisant par contre le temps de calcul est très important. La deuxième technique utilisée pour réduire le temps de calcul a montré cette capacité pour le cas d'un dièdre et un model de bateau générique en mono-statique. Afin de valider notre approche de calcul, nous avons présenté des comparaisons entre les résultats de simulation et les calculs théoriques

Conclusion générale

Dans ce travail de projet de fin d'étude nous nous sommes particulièrement concentrés sur la simulation de la surface Equivalente Radar (SER) en se basant sur la combinaison de méthodes asymptotiques afin d'accélérer et d'optimiser le temps de calcul. En fait, ces méthodes sont typiquement les plus utilisées pour modéliser les phénomènes électromagnétiques lors de l'interaction d'une onde EM et une cible quelconque observé en configuration mono-statique.

L'étude réalisée dans ce mémoire se synthétise à travers trois chapitres. Le premier chapitre présente les systèmes radar, leur fonctionnement ainsi que leurs applications à savoir la détection de navires par radars maritimes, la surveillance et le contrôle. Par la suite, nous avons défini la Surface Equivalente Radar (SER) et les paramètres intervenant dans le calcul de la SER d'un objet.

Dans le deuxième chapitre nous avons exposé les différentes méthodes permettant de calculer la Surface Equivalente Radar (SER), le chapitre se termine par une conclusion sur les techniques de lancer de rayon et de tracer de rayon qui sont utilisés avec les méthodes asymptotiques afin d'optimiser et affiner les résultats de simulation. Dans le chapitre 3, nous avons exposé la démarche adoptée pour concevoir et développer le modèle de simulation de calcul de la SER d'objets simples et complexes en tenant compte des réflexions multiples à l'ordre 2, lors de l'interaction entre l'onde électromagnétique et une cible de forme complexe, ce modèle est basé sur une combinaison de l'optique physique et l'optique géométrique (OG-OP). Afin de valider notre approche de calcul nous avons comparé les résultats obtenus par notre approche avec ceux obtenus par Pofacets, ainsi que ceux publiés dans la littérature.

Le modèle présenté dans ce mémoire permet de calculer le champ diffusé par des objets complexes à l'aide des méthodes asymptotiques, et permet de réduire le temps de calcul concernant la prise en compte des doubles réflexions, l'espace

mémoire. Ce travail peut être amélioré en prenant en compte les interactions multiples à l'ordre trois et la diffraction par les arêtes. Une autre possibilité consiste à trouver un établissement qui possède une chambre anéchoïque afin de réaliser des mesures sur les cibles que nous avons simulé avec notre modèle et valider nos résultats par rapport aux mesures.

Annexe

Annexe A les équations de Maxwell

Nous savons qu'il existe un nombre important d'interactions entre les particules fondamentales qui composent la matière, parmi elles, l'interaction électromagnétique qui est associée à une propriété caractéristique de chaque particule, appelée sa charge électrique.

Pour d'écrire l'interaction électromagnétique, on a introduit la notion de champ électromagnétique, caractérisé par deux vecteurs : le champ électrique \vec{E} . Et le champ magnétique \vec{H} , telle que la force agissant sur une charge électrique soit donnée par :

$$\vec{F} = q.(\vec{E} + V \wedge \vec{B})$$

V : vitesse de la particule.

q : charge électrique.

Les champs \vec{E} et \vec{H} sont également liés l'un à l'autre par les lois d'Ampère-MAXWELL et FARADAY-HENRI, ces relations s'expriment en quatre lois, que nous citerons ci-dessous, et qui peuvent s'écrire sous leurs formes différentielles, comme le représente le tableau suivant :

Loi	Forme Différentielle
Théorie de GAUSS pour le champ électrique	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Théorie de GAUSS pour le champ magnétique	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Loi de FRADAY-HENRI	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Loi d'AMPERE-MAXWELL	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Tableau A-1 : Equations de MAXWELL, Forme différentielle [33]

Annexe B Présentation de l'outil Pofacets

Résumé des capacités du programme

Voici une liste récapitulative des capacités du logiciel:

- Interface utilisateur graphique (GUI) Matlab
- Bibliothèque de formes géométriques communes facilement disponibles
- Capacité de conception manuelle de modèle (les nœuds de triangle de modèle sont entrés manuellement)
- Capacité de conception de modèle graphique (le modèle est généré à partir de composants géométriques de base de la bibliothèque)
- Mise à l'échelle, rotation et translation d'un modèle ou de ses sous-parties
- Fusion de plusieurs modèles existants
- Capacité d'importation de modèles à partir de paquets CAO standard (format STL), ACADS (facette) et triangle.
- Calcul RCS bi-statique ou mono-statique en fonction de l'angle ou de la fréquence
- Les découpes ou contours de surface en sens unidimensionnel dans le sens de l'espace cosinus
- Les parcelles polaires et les parcelles RCS superposées à la géométrie du modèle
- (TMz) ou (TEz) polarisations incidentes
- Les composantes RCS co-polarisées et polarisées sont calculées
- Polarisation circulaire
- La composante RCS diffuse approximative peut être calculée pour les surfaces rugueuses
- Les effets approximatifs d'un terrain infini peuvent être inclus
- Une bibliothèque de matériaux mis à jour par l'utilisateur est incluse
- Les couches de matériaux peuvent être appliquées
- Les plans de symétrie d'un modèle peuvent être définis et exploités pour réduire les temps d'exécution
- L'architecture de code ouvert permet à l'utilisateur d'adapter le code selon des besoins spécifiques

- Les fonctions d'aide et la vérification des erreurs sont incluses pour toutes les fenêtres
- Plusieurs exemples de fichier modèles sont inclus

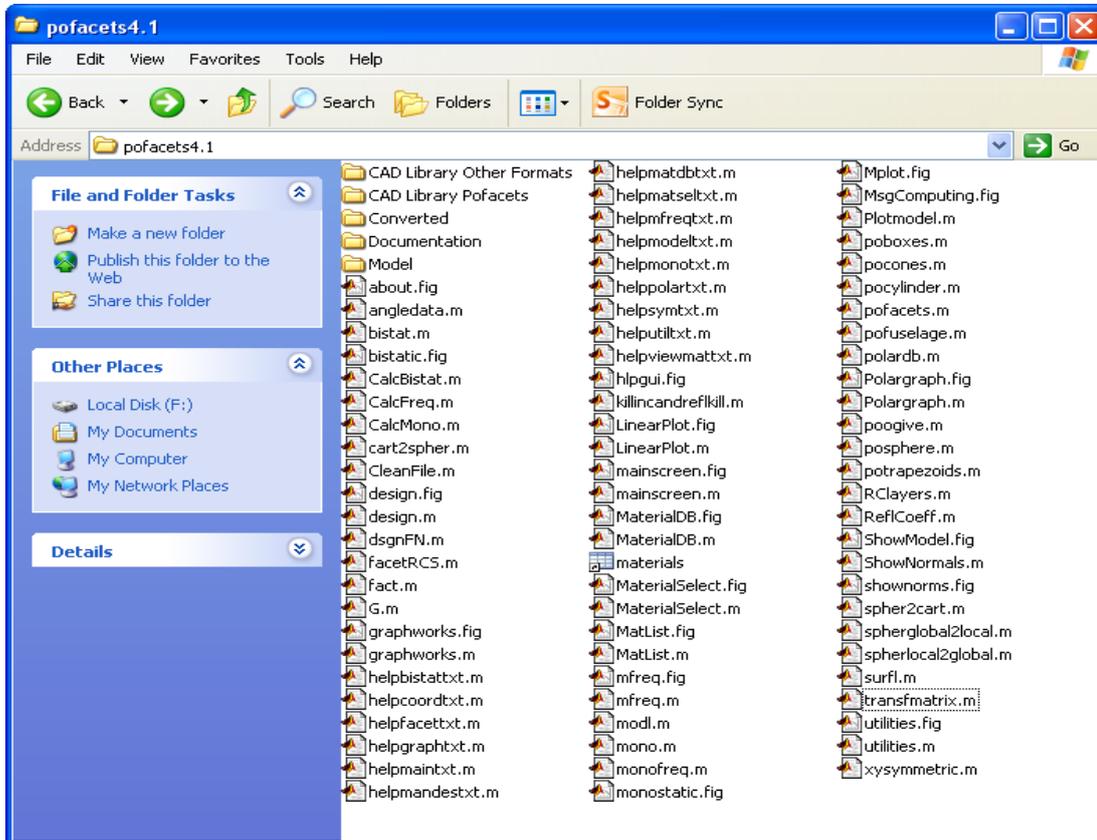


Figure B.3 Installations de Pofacets

Annexe C Matrice de passage

Comme nous l'avons cité dans la section C.1, la représentation géométrique est une étape primordiale dans le calcul de la SER d'une cible complexe. Dans un cas général, le système de coordonnées local d'une facette triangulaire n'est pas aligné avec le système de coordonnées global. Pour ce la on se place dans le repère local à la facette de telle sorte que l'origine du repère coïncide avec l'un des sommets de la facette et l'axe Z_2 est perpendiculaire à la facette.

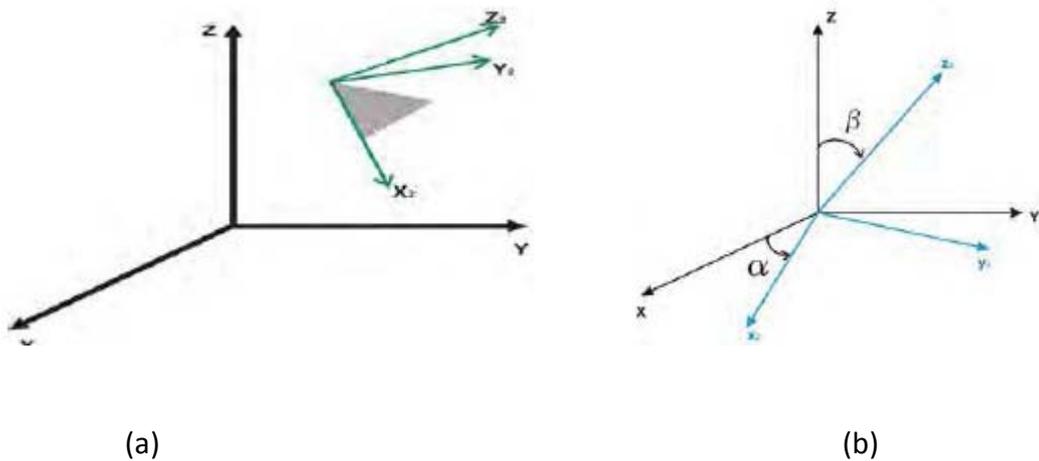


Figure C. 1 Rotation du repère locale par rapport au repère global

La matrice de passage permettant la transition entre les repères s'obtient via deux rotations. La première rotation se fait autour de l'axe Z avec un angle α , et la deuxième rotation se fait autour de l'axe X avec un angle β . Ces deux rotations permettent de simplifier le calcul de l'intégrale I_C . Les expressions des matrices de rotation sont données par les équations C.1 et C.2.

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (C.1)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

En utilisant ces deux matrices, le système de coordonnées global peut être transformé en un système de coordonnées local et vice versa comme l'indiquent les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = T_2 T_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (T_2 T_1)^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

Cette matrice de passage permet de transformer la valeur du champ diffusé dans la base locale de la facette triangulaire à la base globale de la cible, et par conséquent la déduction

De la valeur de la SER.

L'intégrale de l'équation C.3 a été évaluée par Dos Santos et Nilson[34]. Son expression Est donnée par l'équation C.5

$$. I_C = 2S e^{jD_0} \left\{ e^{jD_P} \left[\frac{C_0}{D_p(D_q - D_p)} \right] e^{jD_q} \left[\frac{C_0}{D_p(D_q - D_p)} \right] \frac{C_0}{D_P D_q} \right\} \quad (\text{C.5})$$

Avec

$$D_P = k[(x_1 - x_2)(u_i - u_s) + (y_1 - y_3)(v_i - v_s) + (z_1 - z_3)(w_i - w_s)] \quad (\text{C.6})$$

$$D_q = k[(x_2 - x_3)(u_i - u_s) + (y_1 - y_3)(v_i - v_s) + (z_2 - z_3)(w_i - w_s)] \quad (\text{C.7})$$

$$D_0 = k[x_3(u_i - u_s) + y_3(v_i - v_s) + z_3(w_i - w_s)] \quad (\text{C.8})$$

Où (x_1, x_2, x_3) et (y_1, y_2, y_3) et (z_1, z_2, z_3) , représentent les coordonnées des trois sommets de la facette triangulaire dans le repère local.

Afin d'éviter les erreurs numériques qui se produisent au voisinage des singularités (dénominateurs tendent vers zéro), on utilise un développement en série de Taylo, ce qui nous donne quatre cas à traiter.

Cas 1 : $|D_p| < L_t$ et $|D_q| \geq L_t$

$$I_C = \frac{2S e^{jD_0}}{JD_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_P)^n}{n!} \left\{ \frac{-C_0}{n+1} + e^{jD_P} C_0 G(n, D_q) \right\} \quad (C.9)$$

Cas 2 : $|D_p| \leq L_t$ et $|D_q| < L_t$

$$I_C = 2S e^{jD_0} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_0 (jD_P)^n (jD_q)^m}{(m+n+2)!} \quad (C.10)$$

Cas 3 : $|D_p| \geq L_t$ et $|D_q| < L_t$

$$I_C = 2S e^{jD_0} e^{jD_P} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_q)^n}{n!} \left(\frac{C_0}{n+1} \right) G(n+1, D_q) \quad (C.11)$$

Cas 4 : $|D_p| \geq L_t$, $|D_q| \geq L_t$ et $|D_q - D_p| < L_t$

$$I_C = \frac{2S e^{jD_0}}{JD_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_P - jD_q)^n}{n!} \left\{ C_0 G(n, D_P) + \frac{e^{jD_0 C_0}}{n+1} \right\} \quad (C.12)$$

Où L_t est la longueur de la série de Taylor. La fonction G est définie par :

$$G(n, \gamma) = \int_0^1 s^n e^{j\gamma s} ds \quad (C.13)$$

Et G est évalué en utilisant la relation de récurrence suivante :

$$G(n, \gamma) = \frac{e^{j\gamma} - nG(n-1, \gamma)}{j\gamma}, n \geq 1 \quad (C.14)$$

Avec :
$$G(0, \gamma) = \frac{e^{j\gamma} - 1}{j\gamma} \quad (C.15)$$

Bibliographie

- [1] krattou.M « étude de la détection radar dans un milieu homogène » mémoire master université Tlemcen 2013.
- [2] Brahim Boudamouz. « Contribution à l'étude de nouvelles techniques de radar MIMO pour la détection de cibles en contexte urbain (à l'intérieur des bâtiments)». PhD thesis, L'université de Toulouse, 2013.
- [3] C.FREDERIC « simulation de section efficace radar sur un trajet » mémoire master Université Laval 2007.
- [4] S.BENHASSIN « simulation et mesure de la surface équivalent radar d'Object simple et complexes en ondes millimétriques »Thèse master Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis 2016.
- [5] R.DEBAN« analyse et développement de radar à diversité spatiale application à l'évitement de collisions de véhicules et au positionnement local »thèse doctorat Université de Montréal 2010.
- [6] Bechler, M., Wolf, L., "Mobility management for vehicular ad hoc networks", Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st, Vol. 4, pp. 2294-2298, 30mai-1 juin 2005.
- [7] Bertoni, H.L., Honcharenko, W., Macel, L.R., Xia, H.H., "UHF propagation prediction for wireless personal communications", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 9, pp. 1333-1359, sept. 1994
- [8] A.Boyer « technique et systèmes des logiciels FEKO et NPSW »These doctorat Institut national des sciences application de toulouse 2011
- [9] Hongkun. Li, Nicolas. Pinel, and Christophe. Bourlier, "A monostatic illumination

function with surface reflections from one-dimensional rough surfaces,” *Waves RandomComplex Media* 21, 105–134 (2011).

[10] D. B. Davidson, *Computational electromagnetics for RF and microwave engineering*. University of Stellenbosch, South Africa, 2005

[11] W. C. Gibson, *The method of moments in electromagnetics*. Taylor and Francis group, Boca raton, 2008.

[12] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*. Mac Millan, New York, 1968.

[13] L. Hamilton, “3D method of moments scattering computations using the fast multipole method,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 435-438, June 1994.

[14] J. Song and W. Chew, “Multilevel fast multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 10, pp. 14–19, September 1995.

[15] L. Tsang and H. Sangani, “A banded matrix iterative approach to monte carlo simulations of large scale random rough surface scattering : TE case,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 29, pp. 1185–1200, 1993.

[16] D. Torrungrueng, H. Chou, and J. T. Johnson, “A novel acceleration algorithm for the computation of scattering from two-dimensional large scale perfectly conducting random rough surfaces with the Foward-Backward method,” *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, pp. 1656–1668, 2000.

[17] D. Torrungrueng and J. T. Johnson, “Numerical studies of backscattering enhancement .of electromagnetic waves from two-dimensional random rough surfaces with theforward-backward/novel spectral acceleration method,” *Journal of Optical Society ofAmerica*, vol. 18, pp. 2518–2526, 2001.

[18] D. Torrungrueng and J. T. Johnson, “An improved FB/NSA algorithm for the computation of scattering from two-dimensional large scale rough surfaces waves from two-dimensional random rough surfaces with the forward-backward/novel spectral acceleration method,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 15, pp. 1337–1362, 2001.

- [19] O. Zienkiewicz, *The finite element method in engineering science*. McGraw-Hill, New York, 1971.
- [20] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302–307, May 1966.
- [21] A. Taflove and M. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependant maxwell's equations," *IEEE Transactions on Microwave Theory Technology*, vol. 23, pp. 623–630, 1975.
- [22] RG Kouyoumjian and P Pathak. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface. *Proceedings of the IEEE*, 62 :1448–1461, 1974.
- [23] A. Taflove and K. Umashankar, "Radar cross section of general three-dimensional scatterers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 25, no. 4, pp. 433–440, 1983.
- [24] Ruck, G.T., Barrick, D.E., Stuart, W.D. et Rrichbaum, C.K., *Radar Cross Section Handbook*, Vol. 1, Plénum Press, New York, 1970.
- [25] Ya. Umtsev. « Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction ». John WILEY and sons, 2007.
- [26] R.F. Millar. An approximate theory of the diffraction of an electromagnetic wave by an aperture in a plane screen. *Proceeding of the IEEE*, 104 :87–95, 1957.
- [27] F. Chatzigeorgiadis. Development of code for a physical optics radar cross section prediction and analysis application. PhD thesis, Naval Postgraduate School Monterey CA, 2004
- [28] M.Tomas.P.C .A.band B .Trumbor Fast minimum storage ray triangle intersection 1997
- [29]N.A Albayrak « RCS computation with PO/PTD for conducting and impedance objects mode led as large flate plates » PHD thesis ,liniversité de bilkent 2005.
- [30] Filppos chatzigeorgiadis « developement of code for a physical optics radar cross section pre diction and analysis application » PHD these AVAL POST graduate 2004.

[31] Ling h .R.chou and S.W.Lee « shooting and bounanig rays ;calculating the RCS of an arbitrarity shaped cavity »IEEE trans.on antennas and propagat vol 37 NO -2.194-205,1989.

[32] T.griesser .CA .BALANIS ;BALANIS ,BACKS CATTER analysis of optics and the physical thery of diffraction , IEEE trans.Antennas propag .35(1985).1137.1147

[33] M.AALONSO E.J, Physique Générale, « Champs et ondes »,2éme édition, 1986.

[34] M. Dos Santos and N. Rabelo. On the ludwig integration algorithm for triangular subregions. *IEEE Proceedings*, 74(7) :14551456, 1986