
Validations expérimentales et application à l'imagerie ISAR

Sommaire

4.1	Introduction	105
4.2	Equiments de mesure	106
4.3	Surface Equivalent Radar (SER) du bateau	107
4.4	Imagerie ISAR	113
4.5	Conclusion	119

Dans ce dernier chapitre, nous exposons le dispositif expérimentale en détails. La validation de notre approche est vérifiée en comparant les résultats de simulation de la SER de cibles canoniques et un bateau générique aux mesures réalisées pour les mêmes cibles au sein de la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne. Ensuite, nous exposons la démarche adoptée pour tenir compte du processus de calcul de la SER de cibles complexes (développé dans le chapitre 2) dans une application concernant l'imagerie radar ISAR. Nous proposons d'utiliser un découpage parallélépipédique pour estimer la contribution de la SER des différentes parties de la cible et permettant ensuite de générer l'imagerie d'une scène observée. Cette démarche est illustrée en considérant un modèle de bateau générique placé sur une surface maritime.

4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous exposons approche de calcul et de représentation de la SER, basée sur le découpage parallélépipédique de la cible permettant d'estimer la contribution des différentes parties de la cible. Cette approche utilise la même combinaison de méthodes asymptotiques utilisées au chapitre 2 (Optique Physique (OP)-Optique Géométrique (OG)/Méthode des Courants Equivalents (MCE)), et tient compte de l'ensemble des mécanismes de dispersion (effet d'ombrage, réflexion spéculaire, double réflexions, et aussi la diffraction par les arêtes). L'estimation de la surface équivalente radar (SER) des différentes parties de la cible permettent la reconstruction d'image radar de type ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar). Il existe plusieurs techniques de l'imagerie radar, parmi lesquelles l'imagerie radar SAR (Synthetic Aperture Radar) et ISAR sont les plus courantes [Tou07]. Ces deux techniques sont différentes dans le principe d'acquisition. L'image

SAR [CGM] [Com05] [Maï01] [OQ98], est obtenue par l'utilisation du mouvement d'un radar. Tandis que l'image ISAR elle est reconstruite en se basant sur le mouvement de la cible. Notre cadre d'application se focalise sur l'imagerie ISAR. Ainsi, le travail présenté dans ce chapitre est essentiellement destiné à présenter et valider, via des mesures effectuées dans la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne, la méthodologie adoptée dans le chapitre 2 permettant d'estimer la signature électromagnétique (EM) d'une cible complexe. Les résultats obtenus ont été utilisés dans le processus de reconstruction, et l'analyse de scènes observées (avec ou sans cible complexe). Afin de valider et d'illustrer notre approche, nous avons utilisé dans nos mesures expérimentales ainsi que dans nos simulations le modèle de bateau générique présenté sur la figure 4.2-a. Le bateau exploité est composé d'une coque et de deux cylindres couvert d'aluminium, pour une longueur de 79 cm , une largeur de 14 cm et une hauteur de 35 cm . Tout d'abord, nous présentons dans ce chapitre les équipements de mesure utilisés pour effectuer les expérimentations. Ensuite nous présentons les caractéristiques de la surface équivalente Radar (SER) de bateau générique utilisé, en mettant l'accent sur la configuration géométrique adoptée pour le calcul de sa réponse électromagnétique. Nous validons ainsi le test de visibilité (chapitre 2) pour le bateau générique de la figure 4.2, puis nous comparons les résultats théoriques pour une plaque carrée et un dièdre par rapport aux mesures effectuées dans la chambre anéchoïque. Nous terminons la validation par une comparaison entre la SER théorique du bateau générique et les mesures effectuées. Ensuite, nous présentons le principe de la représentation parallélépipédique proposé pour la SER d'une cible complexe. Enfin, nous présentons l'application concernant l'imagerie ISAR d'une scène [BCK12]. Nous présentons le concept utilisé pour des simulations ISAR ainsi que les expérimentations réalisées dans la chambre anéchoïque, en rappelant le principe de l'imagerie ISAR. Les premiers résultats de l'imagerie ISAR obtenue sont alors présentés.

4.2 Équipements de mesure

Les mesures ont été effectuées dans la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne dont les dimensions $8 \times 5 \times 5\text{ m}$ (figure 4.1-b). La distance entre les antennes et le système de positionnement est de 5 m . L'équipement de mesure est constitué d'un analyseur de réseau et d'un positionneur qui sont pilotés par un ordinateur, ainsi que de deux antennes (émission et réception). Les paramètres fixés sont transmis à l'analyseur de réseau vectoriel de type **Anritsu** de référence (37347D) dont la bande d'utilisation est $40\text{ MHz} - 20\text{ GHz}$. Ce dernier dirige le signal généré vers l'antenne d'émission. L'analyseur de réseau vectoriel détermine le rapport entre le signal émis et le signal reçu. Le positionneur programmable de référence MM4006 de marque (NEWPORT) commande les trois moteurs pas à pas de nos axes d'évolutions :

- Moteur azimut (angle ϕ) avec une précision de $1/100$ degrés, variation de -90° à $+180^\circ$
- Moteur inclinaison (angle θ), avec une précision $1/10$ degrés, variation de -40° à $+40^\circ$
- Moteur élévation permettant l'ajustement de la hauteur de la cible de $\pm 10\text{ cm}$

Une colonne en polystyrène (permittivité proche de 1) sert de support aux cibles. Le plateau accueillant les cibles se trouve à 2 m de hauteur du sol. La configuration géométrique du dispositif d'expérimentation et la localisation du positionneur sont présentées par la figure 4.1.

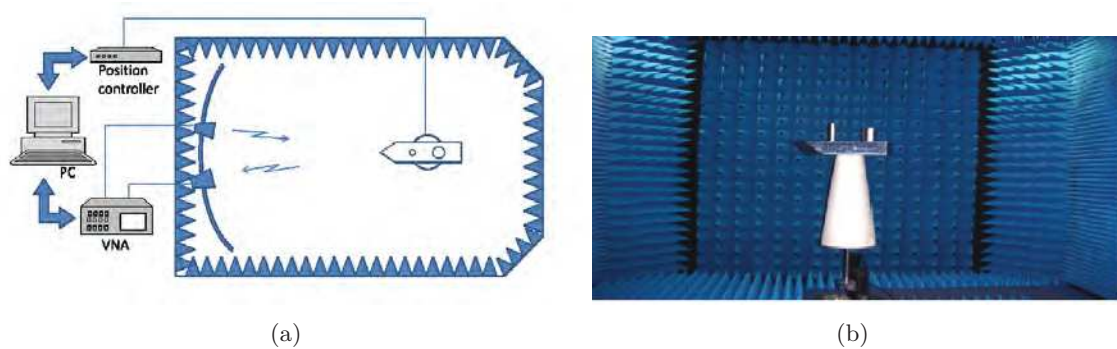


Figure 4.1 — Configuration du système de mesure(chambre anéchoïque)



Figure 4.2 — Photographie de la maquette de bateau utilisé dans l'expérimentation

4.3 Surface Equivalent Radar (SER) du bateau

Le calcul électromagnétique couvre aujourd'hui beaucoup de recherches et de développements dans différents domaines. Nous nous sommes focalisés dans ce chapitre sur les problèmes de diffusion EM et notamment l'analyse de la SER de grandes et petites structures. Pour ceci, nous présentons la géométrie de diffusion adoptée pour le modèle de bateau présenté sur la figure 4.2, ainsi que son maillage triangulaire surfacique associé (figure 4.3-b).

4.3.1 Configuration géométrique du bateau générique

Le positionnement de la cible dans son repère $3D$ est une étape essentielle dans le calcul de la surface équivalente radar (SER) d'une cible de forme arbitraire comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3. La figure 4.3-a illustre la géométrie de diffusion que nous avons considéré pour cette application. Le maillage en facettes triangulaires de la cible est généré à l'aide d'un outil de CAO (CATIA). En accord avec l'approximation haute fréquence pour les méthodes asymptotiques adoptées, la taille de cible doit être grande devant la longueur d'onde. Afin de respecter ce critère, les cibles qui ont des surfaces circulaires doivent être discrétisée avec un maillage triangulaire très fin. La valeur maximale de la facette triangulaire est de l'ordre de $\lambda^2/200$. La figure 4.3-b représente le maillage en facettes triangulaires de la maquette de bateau adoptée pour notre application.

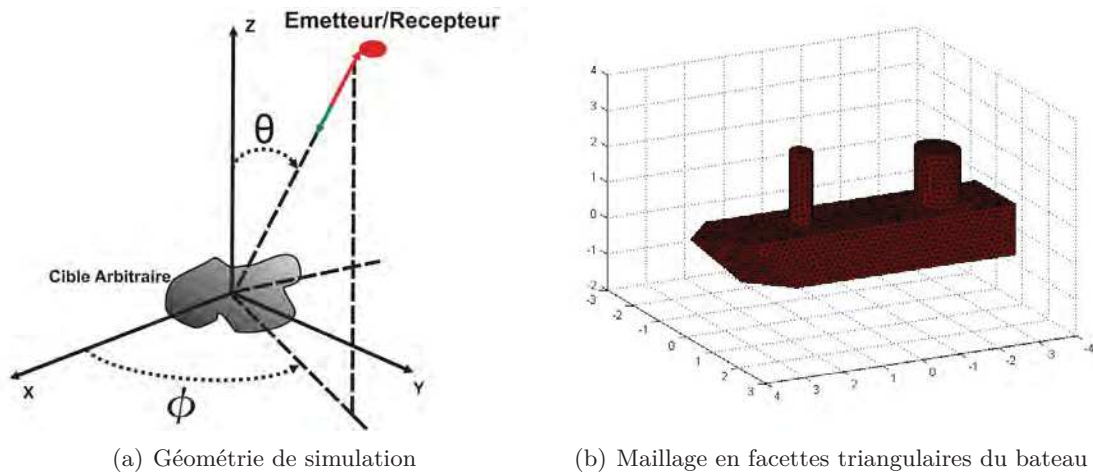


Figure 4.3 — Géométrie d'observation de la cible

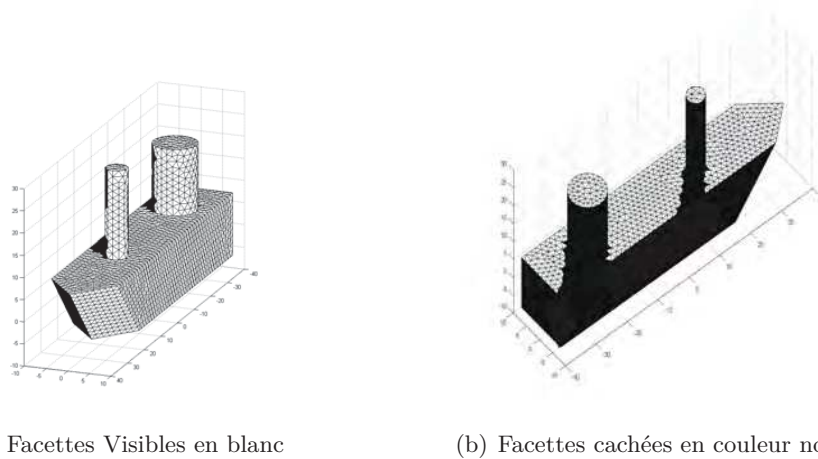
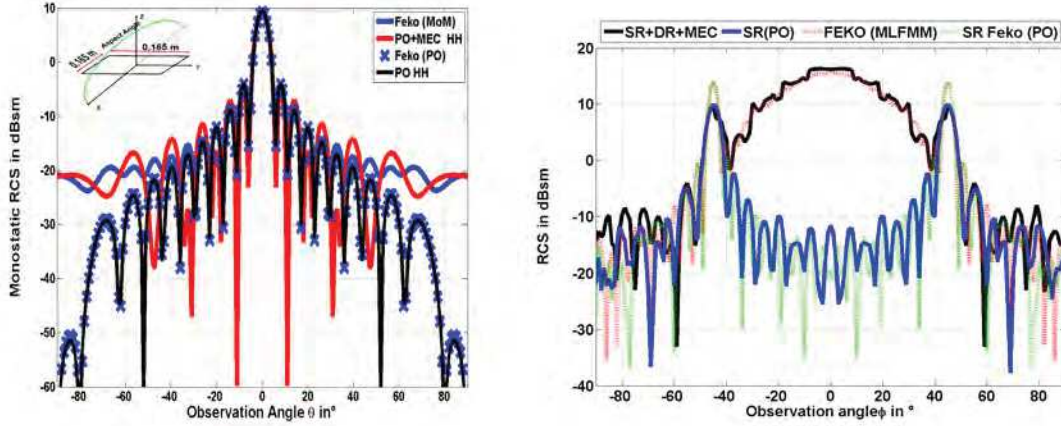


Figure 4.4 — Ombrage et visibilité pour un modèle générique d'un bateau pour une position donnée du radar ($\theta = 45^\circ, \phi = 45^\circ$)

4.3.2 Validation du test de visibilité pour le bateau générique

Le test de visibilité développé au chapitre 2 a été appliqué sur le modèle du bateau générique (4.3-b) adopté pour cette application. La figure 4.4 montre le résultat du test pour une position du radar donnée par $\theta = 45^\circ$ et $\phi = 45^\circ$, dont les facettes visibles sont désignées par la couleur blanche et les facettes cachées par la couleur noire. Nous rappelons que dans la suite nous allons utiliser deux méthodes asymptotiques que nous avons présenté et développé au chapitre 3 (l'Optique Physique(OP) et la Méthode des Courants Equivalents (MCE)).

Après avoir présenté la géométrie d'observation, la section suivante fait l'objet de la validation des résultats de simulation obtenus par notre approche de calcul par rapport aux mesures issues de la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne.



(a) SER monostatique d'une plaque carrée par OP-MCE et FEKO

(b) SER monostatique d'un dièdre carré

Figure 4.5 — SER monostatique d'une plaque carrée (a) et d'un dièdre (b) en utilisant OP-MCE et FEKO

4.3.3 Validation OP-MCE pour des cibles canoniques

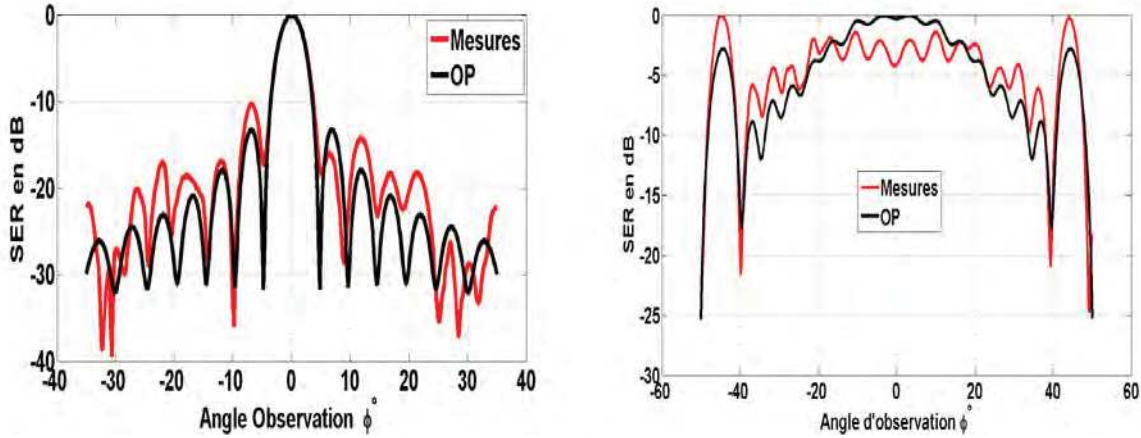
La surface équivalente radar (SER), noté σ correspond à la puissance rétrodiffusée d'un objet éclairé par une onde électromagnétique. Son expression mathématique est donnée par (Cf chapitre 1) :

$$\sigma = \sigma_{pq} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \left| \frac{\vec{E}_{s,p}}{\vec{E}_{i,q}} \right|^2 \right] \quad (4.1)$$

Où R représente la distance entre le radar et la cible, $\vec{E}_{i,q}$ et $\vec{E}_{s,p}$ représentent respectivement les champs à l'émission (en polarisation q) et réfléchi (en polarisation p). Ainsi, le calcul du champ diffusé par la cible permet l'estimation de la signature électromagnétique de la cible illuminée.

La SER d'une plaque carrée a été calculée pour une fréquence d'émission égale à $f = 9.224 \text{ GHz}$. Dans le but de représenter la contribution de la diffraction sur les arêtes, la simulation de la figure 4.5-a présente une comparaison entre différentes méthodes de calcul. La courbe en noire montre les résultats obtenus par l'OP comparés à ceux obtenus par le logiciel FEKO utilisant la méthode des moments (MoM) (courbe bleue avec tirets). La courbe en rouge montre un autre résultat avec prise en compte de la diffraction sur les arêtes par une combinaison de l'OP-MCE comparée aux résultats obtenus par FEKO (MoM). Nous constatons qu'il y a un bon accord entre les deux résultats, nous remarquons également que la contribution de la diffraction apparaît à partir de $\theta = 70^\circ$. Dans l'objectif d'illustrer la contribution des interactions multiples dans le calcul de la SER, nous considérons un dièdre carré parfaitement conducteur formé par deux plaques carrées de côté 5.6088λ . Cette simulation a déjà été présentée au chapitre 3 dans la partie validation à une fréquence de 9.4 GHz [TC87].

Afin de valider notre approche, des mesures ont été effectuées dans la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne pour une plaque carrée avec des dimensions de $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$. Les résultats sont présentés dans la figure 4.6(a). La figure 4.6(b) illustre le résultat obtenu pour un dièdre



(a) SER monostatique d'une plaque carrée (OP) et (Me- (b) SER monostatique d'un dièdre carré (OP) et (Me-
sures) sures)

Figure 4.6 — Comparaison de la SER monostatique calculée par l'approche proposée et les données expérimentales (Chambre Anéchoïque)

carré parfaitement conducteur de dimensions $15\text{cm} \times 15\text{cm}$. Les valeurs théoriques ainsi que celles mesurées sont normalisées pour réaliser une comparaison entre le modèle théorique et l'expérimentation.

Lorsque la plaque du dièdre est normale à l'axe de réception ($\pm 45^\circ$) on retrouve les lobes principaux de la SER d'une plaque plane. Le niveau du signal réfléchi de ces lobes est plus important que les réflexions multiples qui se produisent à l'intérieur du dièdre alors que le modèle théorique contredit cette constatation. Après avoir validé notre approche théorique sur des cibles canoniques, nous présentons dans ce qui suit, le principe de décomposition d'une cible complexe en parallélépipèdes, ce qui facilite le calcul de la SER de la cible globale.

4.3.4 Représentation parallélépipédique de la cible et calcul de la SER

La modélisation électromagnétique (EM) permet de calculer les caractéristiques EM de cibles canoniques et complexes telles que la réflectivité réelle ou complexe, la distribution de la diffusion et/ou la Surface Équivalente Radar (SER). Toutes ces signatures constituent des informations précieuses pour déterminer les particularités de cibles inconnues. De ce fait, un modèle EM fiable et précis est un élément essentiel. Nous présentons dans cette section, une nouvelle approche pour le calcul de la SER de cibles radar complexes. A partir du maillage de la cible en facettes triangulaires (Chapitre 2), nous proposons de regrouper les contributions des facettes dans des parallélépipèdes ou diffuseur qui englobent la cible. Cette nouvelle approche de maillage permet d'avoir une distribution 3D de la SER d'une cible complexe. Ainsi, cette approche permet d'intégrer la cible dans le scénario d'observation (cible intégrée dans son environnement, imagerie radar).

4.3.4.1 Génération des parallélépipèdes

La première étape consiste à générer un parallélépipède englobant la cible. La génération de ce parallélépipède se fait à partir des coordonnées (x, y, z) min. et max. de la cible, puis

le découper en diffuseurs dont la taille dépend de la résolution radar. La deuxième étape consiste à éliminer les parallélépipèdes qui se trouvent en dehors de la frontière de la cible comme le montre la figure 4.7. Cette démarche est similaire de point de vue à la méthode (MLFMM).

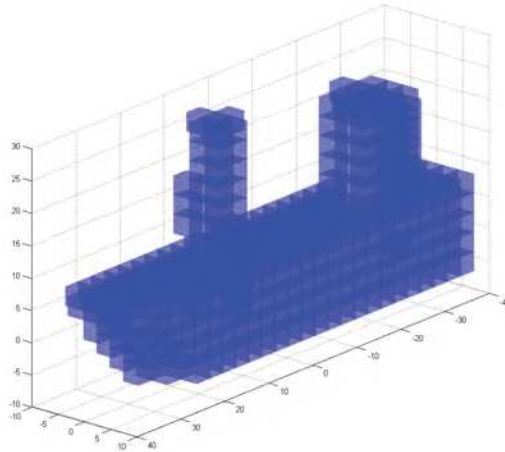


Figure 4.7 — Représentation parallélépipédique d'une cible complexe

L'intérêt de cette technique est de pouvoir attribuer les facettes visibles pour chaque position du radar à un diffuseur donné, en utilisant l'identifiant de chaque facette, ainsi que l'identifiant de chaque cube, ce qui permet de localiser les parties de la cible qui ont une forte contribution dans le calcul de la signature EM. Cette démarche permet d'introduire plus finement une cible dans une scène observée par un radar et notamment au niveau de l'intégration du clutter de mer, et de l'imagerie radar.

4.3.4.2 Découpage parallélépipédique de cible et effet d'ombrage

Pour valider et tester la cohérence de notre démarche avec le test de visibilité (Chapitre 3) appliqué à une cible maillée, nous avons testé la visibilité des parallélépipèdes (diffuseurs) après les avoir identifiés par rapport aux facettes visibles. Pour qu'un parallélépipède soit illuminé, il suffit qu'il contienne au minimum une facette triangulaire visible, sinon il est considéré comme non visible. Un exemple de réalisation est donné sur la figure 4.8, dans lequel les facettes visibles sont en couleur blanche, de même pour les parallélépipèdes correspondants.

4.3.5 Résultats expérimentaux

L'objectif de cette section est de présenter les résultats de calcul de la Surface Equivalente Radar (SER) de la maquette (figure 4.9) et de les comparer par rapport aux mesures effectuées ainsi que ceux obtenus en utilisant par FEKO. La surface Equivalente Radar (SER) du bateau générique considéré sera mesurée sur 360° .

Pour notre application et dans le but de comparer nos résultats de simulation avec les données réelles, nous avons exploité les données issues de la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne dont les caractéristiques ont été présentées dans la section 4.2. Le dispositif de

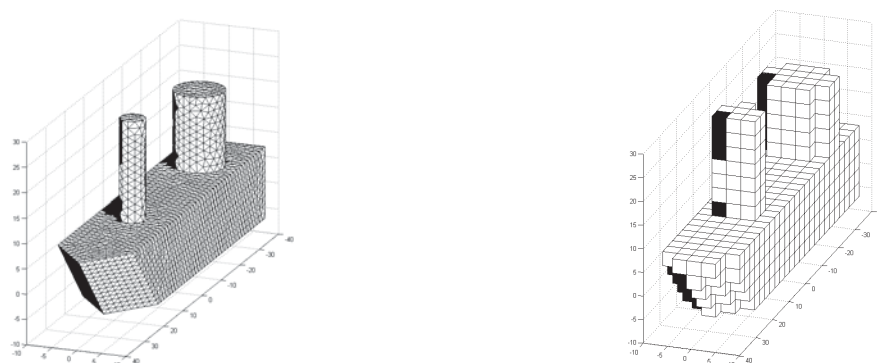


Figure 4.8 — Visibilité des parallélépipèdes pour une configuration mono-statique $\theta_i = \phi_i = 45^\circ$

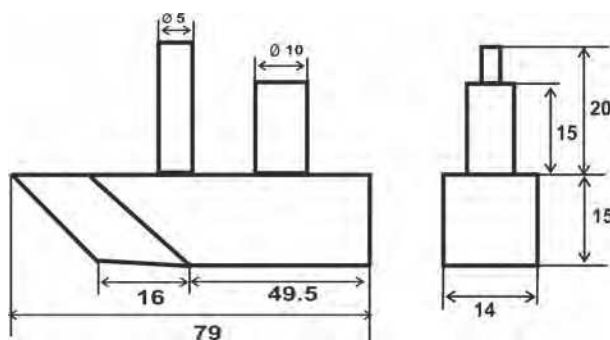


Figure 4.9 — Forme géométrique du bateau considéré

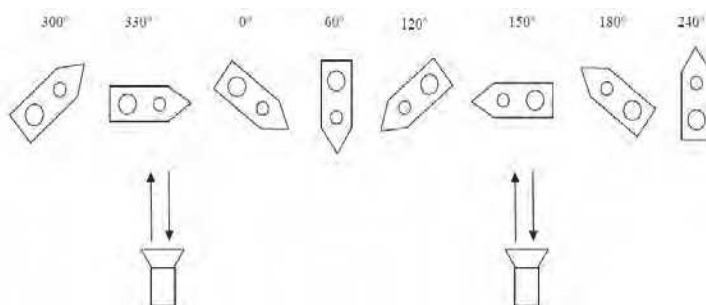


Figure 4.10 — Rotation du bateau dans la chambre anéchoïque

mesure utilisé permet l'acquisition des échantillons complexes retrodiffusés (en quadrature et en phase) par le modèle de cible (maquette présentée sur la figure 4.2) utilisé dans notre application, pour toutes les différentes polarisations. La chambre est équipée aussi d'un dispositif de commande du positionnement de la cible permettant d'assurer les mouvements de rotation et élévation.

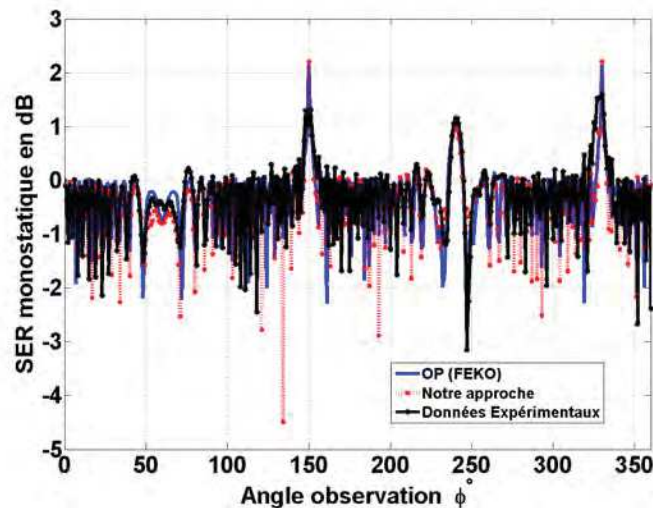
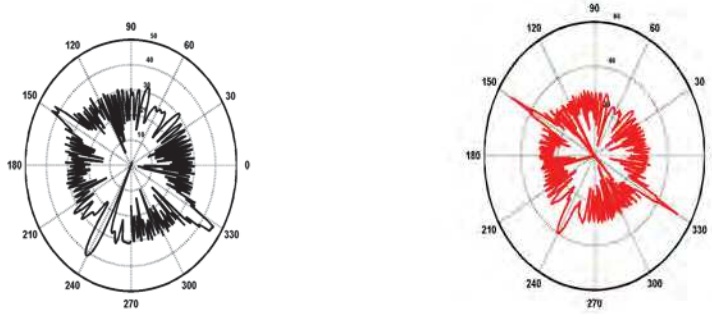


Figure 4.11 — Comparaison de la SER monostatique issue de l'approche développée, FEKO et les données réelles

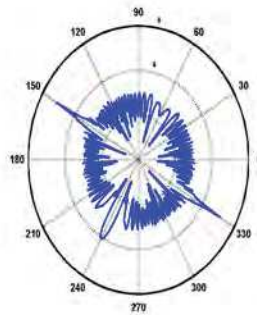
La variation angulaire du positionneur est limitée à 180° ce qui nous a conduit à effectuer les mesures en deux fois afin d'avoir une rotation complète du bateau. La figure 4.10 schématise la rotation du bateau lors des mesures effectuées. Après traitement des données on obtient la représentation sous forme polaire de la SER de la maquette. L'influence de la plaque à la poupe du bateau combinée avec les cylindres a une influence sur une plage angulaire de 60° qui est relativement importante. L'effet de pointe de la proue du bateau et les cylindres ressortent bien et on constate qu'il y a en plus les effets de plaque de l'avant du bateau qui apparaissent. Afin d'illustrer la validité de notre démarche nous avons présenté sur la figure 4.11 la SER mono-statique du bateau générique obtenue par notre approche et celle obtenue par le logiciel FEKO. Sur la figure 4.12, nous avons présenté la SER mono-statique en coordonnées polaires, qui permet une meilleure interprétation des résultats. L'ensemble des figures 4.12-a, 4.12-b et 4.12-c permet de comparer le résultat obtenu par notre approche et celui obtenu par le logiciel FEKO, ainsi que le résultat obtenu par les mesures effectuées dans la chambre anéchoïque de l'ENSTA Bretagne. Cette comparaison montre la fiabilité de notre approche avec les résultats expérimentaux. Les résultats présentés dans cette partie montre la précision de la représentation parallépipédique de la SER. En vue de l'intégrer dans le processus de la reconstruction de l'imagerie ISAR, nous présentons dans la section suivante les aspects généraux de l'imagerie ISAR, son principe ainsi que les résultats obtenues pour la maquette du bateau utilisé.

4.4 Imagerie ISAR

L'utilisation de l'imagerie radar de cibles complexes (navires, avions, vaisseau spatial, ...) pour la classification et la reconnaissance est devenue une exigence essentielle pour les radars,



(a) SER du bateau(données Expérimentales data) (b) SER du bateau (Notre approche)



(c) SER du bateau (FEKO)

Figure 4.12 — Représentation polaire de la SER pour le modèle générique du bateau (comparaison entre les résultats de notre approche FEKO et données Expérimentales)

y compris la surveillance maritime aéroportée. Il existe deux technologies de l'imagerie radar, le SAR (Synthetic Aperture Radar) et ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) [Men91]. Dans le premier cas l'antenne est en mouvement et la cible est stationnaire. Quant à la deuxième technologie l'antenne est fixe et la cible est en mouvement. L'application présentée dans ce chapitre est principalement consacrée à la technologie ISAR dont la géométrie est présentée dans la figure 4.13. Le principe de l'imagerie ISAR est bien connu et couramment utilisé dans les recherches [MSYZ⁺08] [PBL10] [SHHTKT10]. Les Radars classiques permettent de détecter des cibles et estimer leur distance. Dans le cas d'un radar monostatique, la distance entre la cible et le radar est donnée par : $d = c.t/2$ avec $c = 3.10^8 m/s$ la célérité de la lumière et t est le temps entre le signal transmis et le signal reçu [Sko90]. Une autre application est d'utiliser le phénomène Doppler pour estimer la vitesse relative (v_r) d'une cible par rapport au radar. L'affinage Doppler (en anglais : *DBS pour Doppler Beam Sharpening*) correspond à une acquisition des images où l'antenne est en rotation et en gisement, avec une vitesse angulaire donnée [Tou07]. Ce mode est adopté par des radars aéroportés afin d'acquérir une image du sol autour du porteur. L'expression du décalage Doppler est donnée par $f_d = 2v_r/\lambda$, avec λ représente la longueur d'onde. Dans cette section, dans un premier temps nous présentons le principe de l'imagerie et le concept d'utilisation des simulations et des expérimentations ISAR. Ensuite, nous décrivons l'algorithme ISAR et les caractéristiques de l'imagerie ISAR. Enfin, nous présentons les résultats de simulation et de l'expérimentation.

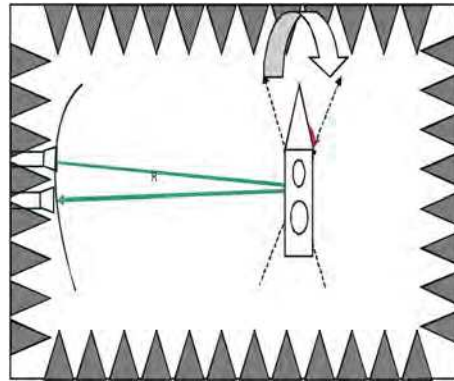


Figure 4.13 — Géométrie d'observation ISAR. (Le radar est stationnaire et la cible tourne autour d'un angle donné)

4.4.1 Principe de l'imagerie ISAR

L'intérêt général de l'imagerie ISAR est donné dans [Sou99]. Les images sont obtenues en deux étapes. La première est une analyse en distance permettant d'améliorer la résolution. Le signal utilisé dans l'imagerie radar est un signal large-bande, en vue d'améliorer la résolution. En effet, la résolution sera inversement proportionnelle à la bande passante. Le signal transmis peut être un chirp, un signal FMCW, etc. Puis l'effet Doppler dû au mouvement de la cible est utilisé pour améliorer la résolution transverse et d'obtenir une image 2D. Ainsi, les caractéristiques de la plage de résolution transverse dépendra du domaine d'observation : le pas et la taille.

Dans cette application, le signal transmis $s_e(t)$ est un signal à saut de fréquence défini par sa fréquence porteuse, la bande passante et le saut de fréquence. Le radar émet une séquence de M impulsions. Chaque impulsion est constituée de N bandes d'impulsions étroites. Dans chaque impulsion, la fréquence centrale f_m de chaque impulsion successive est augmentée par un pas constant δf . Afin de simuler le signal reçu il nous faut introduire deux descriptions du temps : temps court et temps long. Le temps court correspond à la durée d'une acquisition et le temps long correspond aux acquisitions successives. Ainsi, le signal peut être donné comme une matrice $S_r(n, m)$ [PC80]. Si l'on considère un seul diffuseur, la réponse impulsionnelle est donnée par :

$$S_r(t) = \sigma \delta(t - t_{AR}) \quad (4.2)$$

Et dans le domaine fréquentiel :

$$S_r(f) = \sigma \exp(-2\pi f t_{AR}) \quad (4.3)$$

Où σ désigne la SER d'un diffuseur, δ est l'impulsion du Dirac et t_{AR} est le temps du retard entre le signal transmis et le signal reçu. Comme le domaine des fréquences est échantillonné en N échantillons, nous obtenons :

$$S_r(n) = \sigma \exp(-2\pi f_n t_{AR}) \quad \text{avec } n \in \{0, N - 1\} \quad (4.4)$$

Si l'on considère non pas un diffuseur mais Q diffuseurs dans la scène observée. Le signal

reçu devient :

$$S_r(n) = \sum_{q=1}^Q \sigma_q \exp(-2\pi f_n t_{AR,q}) \quad (4.5)$$

Maintenant nous considérons la matrice obtenue à partir de M acquisitions successives. Dans ce cas la SER de chaque diffuseur ainsi que le temps de propagation seront différents pour deux acquisitions consécutives. Donc, le signal reçu devient alors :

$$S_r(n, m) = \sum_{q=1}^{Q_m} \sigma_{q,m} \exp(-2\pi f_n t_{AR,q,m}) \quad \text{avec } m \in \{0, M-1\} \quad (4.6)$$

$S_r(n, m)$ est une matrice de données complexes M par N , organisée en somme de rang $2D$, ce qui représente la signature fréquentielle et spatiale de la cible. Ensuite, l'algorithme de traitement radar utilise les signatures fréquentielles comme des lignes de données pour effectuer l'analyse en distance et la compensation standard du mouvement.

4.4.2 Algorithme ISAR

A partir du signal reçu, les algorithmes ISAR classiques permettent d'obtenir une image en trois étapes principales. La première consiste à formater les données et à réaliser la compensation du mouvement. La deuxième étape est un filtrage adapté qui permet d'améliorer la résolution en distance. La résolution est alors inversement proportionnelle à la bande passante. La bande passante totale de l'impulsion B i.e., M fois le temps de saut de fréquence Δf , détermine la résolution de portée du radar [CKBP06]. La résolution en distance et la fenêtre d'ambiguïté sont données par :

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad \text{avec } \Delta_r = \frac{c}{2\Delta f} \quad (4.7)$$

La troisième étape concerne le traitement de la résolution transverse. L'approche de Fourier en imagerie consiste à prendre la transformation de Fourier rapide et générer un spectre Doppler de M points. Ensuite, la résolution transverse et la fenêtre d'ambiguïté sont données par :

$$\delta_{cr} = \frac{\lambda_{mean}}{2\Omega} \quad \text{avec } \Delta_{cr} = \frac{\lambda_{mean}}{2\Delta\alpha} \quad (4.8)$$

Où λ_{mean} est la longueur d'onde moyenne, Ω est l'angle d'observation total et $\Delta\alpha$ désigne le pas angulaire d'acquisition.

La fenêtre d'ambiguïté et la résolution sont représentées sur la figure 4.14.

4.4.3 Simulation et données expérimentales

4.4.3.1 Description de la cible

Afin de construire l'image ISAR d'une cible, la SER de la cible doit être introduite dans le signal simulé. Cette information est très importante et va influencer directement la qualité et le réalisme de l'image. La cible peut être introduite dans le simulateur avec diverses techniques. Tout d'abord, la cible peut être associée à un seul point brillant, cette approche

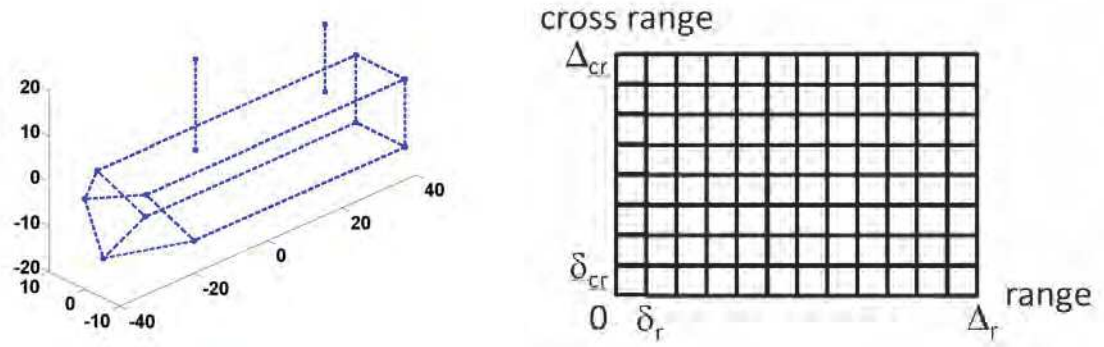


Figure 4.14 — Modèle de points brillants et la résolution d'une image ISAR

permet l'introduction d'un niveau correct de la SER dans la simulation, mais la représentation de la cible dans l'image $2D$ sera un seul point. Ainsi, nous n'aurons aucune information sur la géométrie de la cible. La seconde approche, consiste à modéliser la cible avec différents points brillants. Dans ce cas la cible est modélisée par un ensemble de réflecteurs isotropes correspondant aux parties de la cible qui diffusent plus d'énergie comme le montre la figure 4.14. Cette approche fournit une représentation en $2D$ de la cible dans l'image radar, mais ne tient pas compte de la variation de la SER pendant l'observation.

Dans notre approche, le signal est exprimé comme suit :

$$S_r(n, m) = \sum_{q=1}^{Q_m} \sigma_{q,m} \exp(-2\pi f_n t_{AR,q,m}) \quad (4.9)$$

Où les Q_m diffuseurs correspondent aux parallélépipèdes. Dans ce cas, il est possible d'obtenir une représentation $2D$ de la cible dans l'image radar, en tenant compte de la variation de la SER pendant l'acquisition.

4.4.3.2 Configuration de l'acquisition

Dans le but de comparer les données de la simulations avec celle issues de l'expérimentation, nous avons choisis la même configuration d'acquisition dans les deux cas. Le signal utilisé dans la phase d'acquisition est un signal à saut de fréquence. Chaque donnée instantanée a été obtenue pour 33 sauts de fréquence de $\Delta f = 150 MHz$, répartis uniformément sur la bande $B = [12; 17] GHz$. En conséquence, la résolution en distance-temps et la fenêtre d'ambiguïté sont données par :

$$\delta_r = \frac{c}{2B} = 3 \text{ cm} \quad \text{et} \quad \Delta_r = \frac{c}{2\Delta f} = 1 \text{ m} \quad (4.10)$$

$$\delta_{cr} = \frac{\lambda_{mean}}{2\Omega} = 3 \text{ cm} \quad \text{et} \quad \Delta_{cr} = \frac{\lambda_{mean}}{2\Delta\alpha} = 1 \text{ m} \quad (4.11)$$

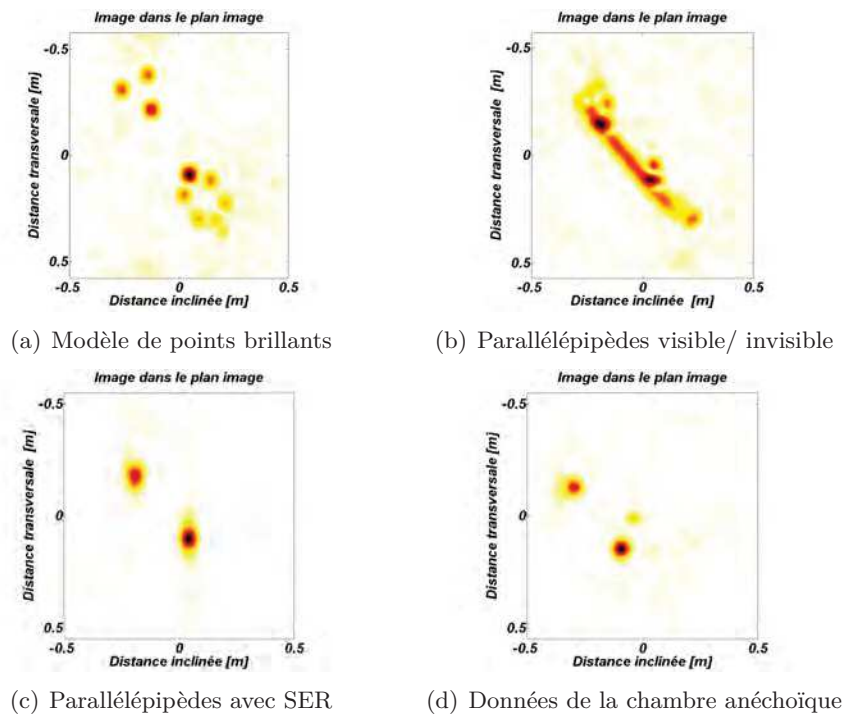


Figure 4.15 — Imagerie ISAR pour la première acquisition

4.4.3.3 Imagerie ISAR obtenue

Les différentes façons d'introduire une cible dans une simulation sont comparées entre elles et avec des données réelles. La cible considérée est présentée sur la figure 4.9. Dans une première simulation, nous avons introduit la cible considérée dans le simulateur comme des points brillants. Puis, nous avons utilisé la représentation parallélépipédique présentée dans la section 4.3.4. Finalement, les résultats obtenus sont comparés avec les données obtenues dans la chambre anéchoïque.

Dans cette première configuration, l'observation de la cible est réalisée pour $\theta = 90^\circ$ et $\phi = -120^\circ$. Dans la figure 4.15-a, nous trouvons la position de chaque point brillant, mais cette image n'est pas réaliste. En effet, nous avons juste la position des points brillants, mais les phénomènes physiques (Ombrage, valeurs de la SER...) ne sont pas présents. La figure 4.15-b tient compte seulement de l'information de visibilité de chaque parallélépipède, donc nous pouvons trouver quelques caractéristiques géométriques du navire considéré. Puis nous introduisons la SER de chaque parallélépipède et l'image obtenue est très proche des données réelles. Nous pouvons voir sur ces deux images (figure 4.15-c et figure 4.15-d), que seulement les deux cylindres du bateau considéré sont visibles et que les autres parties du bateau ne sont pas présents sur l'image ISAR. Il y'a un petit décalage à gauche entre la figure figure 4.15-c et figure 4.15-d, due à l'imprécision du système de positionnement de la chambre anéchoïque.

Dans la deuxième configuration de l'acquisition, nous observons le bateau par l'arrière ($\theta = 90^\circ, \phi = -180^\circ$). Comme la configuration précédente, la représentation de points brillants permet d'obtenir leur position dans l'image ISAR, sans les caractéristiques de propagation.

Les figure 4.16-b et 4.16-c, illustrent les effets d'ombrage, en particulier entre les deux

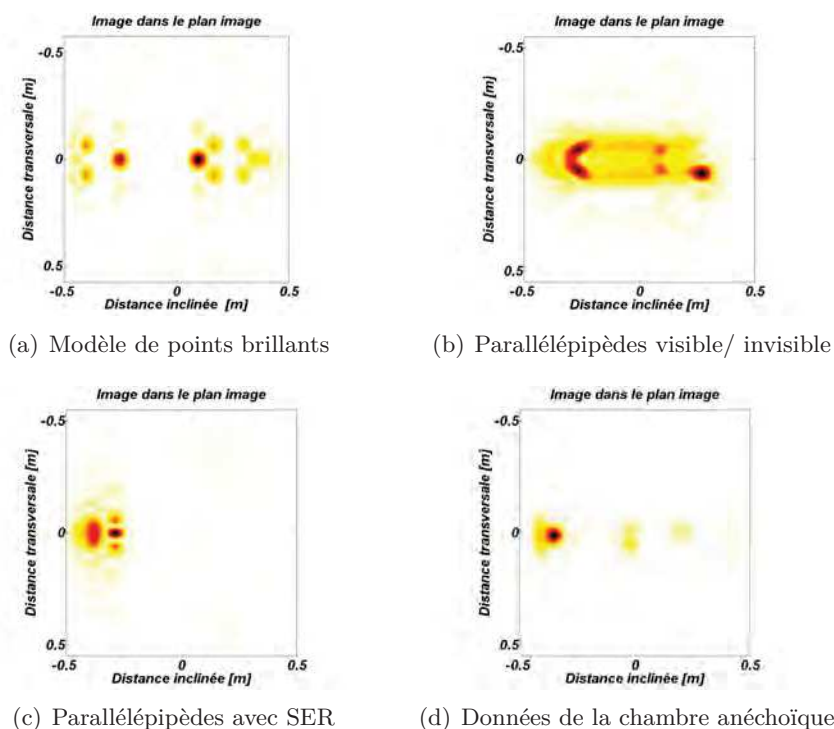


Figure 4.16 — Imagerie ISAR pour la deuxième acquisition

cylindres. L'image présentée dans la figure 4.16-d est obtenue à partir des données de la chambre anéchoïque, le second cylindre est présent en raison des multi-tragets qui ne sont pas pris en compte dans cette application.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de base et les caractéristiques de l'imagerie radar ISAR qui constitue une application de notre modèle exposé dans la section 4.3.4. Une approche de représentation de la SER mono-statique de cibles complexes sous forme de parallélépipèdes est développée et présentée. Une application de cette approche est appliquée sur un modèle d'un bateau générique (figure 4.9). Le modèle proposé calcule le champ diffusé par une cible complexe. Le modèle utilise une combinaison des méthodes asymptotiques étudiées dans les chapitres 2 et 3, ainsi que des mécanismes de dispersion présentée dans le chapitre 2. Ce modèle est basé sur une représentation en parallélépipède de la SER. Cette approche est utilisée dans le cadre de l'imagerie ISAR. La comparaison des résultats de la SER obtenus par cette approche avec les résultats obtenus par le logiciel FEKO montrent que l'approche proposée a une précision suffisante pour notre application (imagerie ISAR). Dans cette approche, des données brutes ont été générées et l'image ISAR a été obtenue en utilisant une représentation de la SER en parallélépipède. Les résultats obtenus pour la cible proposée (bateau générique) montrent l'adaptabilité de ce modèle. Les images ISAR obtenues avec cette approche ont été comparées avec celles obtenues par le modèle de points brillants et celles obtenues en utilisant les mesures issues de la chambre anéchoïque. Nous constatons que l'approche proposée permet d'obtenir des résultats très proches des données réelles.

Les images ISAR-2D et 3D permettent d'augmenter et d'enrichir la quantité d'informa-

tion recueillie sur les cibles et d'informer ensuite quant à leur structure et forme. De plus, leur variabilité à la rotation est nettement moins importante que celle des profils distance. Cependant, les traitements sont plus complexes. La représentation $2D$ (image ISAR $2D$) est toutefois, une représentation qui permet de réaliser un compromis entre complexité de calcul et contenu informatif des signatures électromagnétiques.

D'autres applications de l'approche de représentation de la cible complexe en parallélépipèdes et ensuite le calcul de la SER pourrait être l'introduction des cibles complexes dans leur environnement (cibles complexes + surface de mer) où de la représentation des images $3D$.

Annexes

A

Tableau comparatif des différentes méthodes

Comparaison entre les différentes méthodes de calcul de la SER

Les différentes méthodes de calcul implémentées dans les logiciels disponibles dans la littérature sont principalement au nombre de six avec chacune des particularités et limites différentes. Ainsi, nous allons les comparer dans le tableau A.1 qui suit afin de montrer leurs avantages et limites ainsi que pour quel genre d'application elles peuvent être utilisées. En effet, les activités de recherche menées au sein du groupe REMS de l'ENSTA Bretagne étant assez spécifiques, il faut être certain que les méthodes choisies pourront répondre aux besoins de l'équipe.

En ce qui concerne la SER, la communauté scientifiques utilise et exploite plusieurs simulateurs de calcul électromagnétiques basés sur différentes méthodes, exactes, asymptotiques et hybrides (combinaison entre les méthodes exactes et asymptotiques) [Bal05]. Pour les applications radars (imagerie, détection et localisation) la modélisation du champ diffusé par des objets complexes à l'aide des méthodes asymptotiques permet de réduire le temps de calcul, d'espace mémoire et offre aussi la possibilité d'analyser la contribution de chaque phénomène de diffusion (diffraction, réflexions multiples...) par rapport aux méthodes exactes. Le tableau A.2 recense les principaux logiciels commerciaux qui proposent les méthodes asymptotiques pour la simulation de la SER de cible.

Méthodes	Avantages et applications	Limitations et commentaires
OG	<ul style="list-style-type: none"> – Champ lointain – Haute fréquence – Réflexions d'ordre supérieur 	<ul style="list-style-type: none"> – Ne tient pas compte de la diffraction – Rayon de courbure grand devant la longueur d'onde – limité aux caustiques – Difficile pour cible complexe
OP	<ul style="list-style-type: none"> – Haute fréquence – Réflexion d'ordre 1 en spéculaire – Basé sur le courant de surface – Bonne approximation pour les points éloignés des discontinuités 	<ul style="list-style-type: none"> – Diffraction, réflexions d'ordre supérieur, dispersion et polarisation des ondes de surface ne sont pas pris en compte
TUD	<ul style="list-style-type: none"> – Diffraction prise en compte – Meilleure précision que l'OG et l'OP 	<ul style="list-style-type: none"> – Difficile pour les surfaces complexes – Temps de calcul plus long
MLFMM	<ul style="list-style-type: none"> – Très bonne amélioration des résultats de la méthode des moments. – Tous les mécanismes de dispersion sont inclus. – Réduit le temps de calcul et l'espace mémoire 	<ul style="list-style-type: none"> – Augmente les capacités de calcul tout en permettant d'avoir de très bons résultats
FDTD	<p>La cible est discrétisée en cellules où le champ y est calculé par étapes discrètes. Les opérateurs différentiels de l'équation de Maxwell sont approchés par des différences finies. Tous les phénomènes de dispersion sont considérés</p>	<p>Les approximations faites engendrent les incertitudes La dimension de la cellule détermine le pas temporel et la fréquence limite de calcul</p>
MoM	<p>Toute gamme de fréquences. Tous les phénomènes de dispersion sont considérés. L'équation intégrale est ramenée à un problème matriciel dont la taille de la matrice dépend de celle de l'objet par rapport à la longueur d'onde Résultat précis dans toutes les directions, mais pour des configurations limitées</p>	<p>L'erreur croit avec la taille de la matrice. En haute fréquence il faut des ordinateurs très puissants</p>

Tableau A.1 — Comparaison entre les différentes méthodes de calcul de la SER

Simulateur	Méthodes utilisées	Domaines d'application
CADRCS [CAD]	OP+TPD	calcul du champ en zone lointaine pour les applications en SER et en imagerie radar
RADBASE [RADA]	OP+technique de Sommerfeld [Ruc70]	calcul du champ en zone lointaine pour les applications en SER et en imagerie radar
EPSILON [EPS]	OP+TPD+OG	calcul du champ en zone lointaine pour les applications en SER et en imagerie radar
XPATCH [XPA]	OP+TID	calcul du champ en zone lointaine pour les applications en SER et en imagerie radar
FEKO [FEK]	OP+TUD+OG+methodes numériques	calcul de SER, modélisation de circuit RF, modélisation des antennes...
FACETS [GAL98]	OG+TUD	calcul de SER
RAPPORT [HE97]	OG+TUD	calcul de SER
SPEC-RAY-EM [SPE]	OP+OG+MEC	calcul de SER et imagerie radar

Tableau A.2 — Simulateurs électromagnétiques spécialisés développés dans la littérature.

