



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **TE6712 V1**

Date de publication :
10 août 2011

Furtivité électromagnétique

Cet article est issu de : **Électronique - Photonique | Technologies radars et applications**

par **Fabrice AUZANNEAU**

Résumé L'histoire de la furtivité est assez récente mais a connu une accélération dans les dernières décennies donnant lieu à plusieurs générations d'aéronefs furtifs, notamment le Lockheed F22 et le F22 Raptor. Les engins furtifs sont conçus pour défléchir ou absorber les ondes et renvoyer vers le radar un signal très atténué. La furtivité repose sur quelques principes de base liés aux phénomènes électromagnétiques en présence. La surface équivalente radar de l'objet doit être réduite au maximum, afin qu'il soit détecté le plus tard possible par les radars. La conception d'un engin furtif obéit à des règles en termes de forme, de cavités, de choix de matériaux absorbants. Depuis ces avancées, la furtivité a été appliquée avec succès aux missiles, drones et navires de guerre.

Abstract The history of stealth is fairly recent but has experienced a significant development over the past decades leading to the creation of several generations of stealth aircrafts and notably the Lockheed F22 and the F22 Raptor. Stealth aircrafts are conceived in order to deflect or absorb waves and send back to the radar a very attenuated signal. Stealth is based upon several basic principles linked to existing electromagnetic phenomena. The radar equivalent surface of the object must be reduced to the minimum so that it is detected by radars as late as possible. The design of a stealth aircraft is subjected to rules in terms of shape, cavities and choice of absorbing materials. Since these developments, stealth has been successfully applied to missiles, drones and warships.

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **20/10/2020**

Pour le compte : **7200048521 - ensta bretagne // 193.52.45.16**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Furtivité électromagnétique

par **Fabrice AUZANNEAU**
Chef du Laboratoire de fiabilisation des systèmes embarqués au CEA LIST

1. Introduction	TE 6 712 - 2
2. Théorie.....	— 3
3. Conception d'un engin furtif	— 13
4. Zoom sur le Lockheed F117	— 21
5. Zoom sur le F22 Raptor	— 22
6. Mesure de SER	— 23
7. Conclusion.....	— 24
Pour en savoir plus	Doc. TE 6 712

Au début des années 1990, de nouveaux concepts d'avions ont été dévoilés, visant à échapper aux radars suffisamment longtemps pour effectuer leur mission en toute sécurité. Basés sur des travaux remontant aux années 1970, les avions furtifs (tels le fameux F-117) sont conçus pour défléchir ou absorber les ondes et renvoyer vers le radar un signal très atténué. La furtivité repose sur quelques principes de base, appliqués depuis avec succès aux missiles, drones et navires de guerre. Nous allons passer en revue ces principes et leur mise en œuvre.

Les figures de ce dossier sont visibles en couleurs dans la version électronique sur le site des Techniques de l'Ingénieur.

1. Introduction

1.1 Rappels sur le radar

1.1.1 Historique

À peine plus de dix ans après le premier vol des frères Wright, la première guerre mondiale a été un formidable tremplin pour l'aviation. Utilisés d'abord pour des missions de reconnaissance, puis pour du bombardement, les avions ont joué un rôle essentiel dans ce conflit. Dès 1915, les Allemands avaient acquis la supériorité dans les airs et les efforts de guerre, anglais puis français ont permis aux alliés de reprendre l'avantage dès 1916. L'histoire retiendra de nombreux noms parmi les as de l'aviation aussi bien allemands que français, qui ont tous contribué à développer rapidement les technologies aéronautiques.

La modernisation des avions était telle qu'au début de la seconde guerre mondiale, l'aviation avait déjà un fort potentiel guerrier, devenant un élément primordial de stratégie militaire. De nombreux rôles étaient attribués aux avions : reconnaissance et transport, mais aussi bombardement, patrouille, chasse, attaque au sol, lâcher de parachutes et de colis. Il a donc été essentiel de développer une contre-mesure afin de lutter le plus efficacement possible contre les diverses menaces aériennes.

La défense anti-aérienne s'est développée très tôt, visant à détecter au plus vite les avions attaquant pour les détruire avant qu'ils puissent remplir leur mission. Les moyens de détection allaient à l'origine de la simple inspection visuelle et auditive du ciel à l'utilisation de canons à lumière, notamment lors de la Bataille d'Angleterre dès juin 1940.

Mais auparavant, suite aux travaux du très inventif Nikola Tesla en 1917, complétés par Robert Watson-Watt dans les années 1930, la possibilité de détecter un avion à distance et de mesurer son éloignement, en utilisant des ondes électromagnétiques continues puis pulsées, a mené au développement du RADAR.

1.1.2 Détection à distance

Le mot RADAR est un acronyme anglais signifiant « *Radio Detection And Ranging* », traduit par « détection et mesure de la distance par ondes radio ». Son utilisation en temps de conflit date du début de la seconde guerre mondiale, pour contrer la menace des bombardiers pouvant voler plus haut que la portée des canons de DCA et atteindre les lignes alliées en moins de vingt minutes.

Les Anglais ont ainsi construit une chaîne de stations radars appelée « *Chain Home* » pour protéger leurs côtes, opérationnelle dès 1937 et capable de détecter des avions à plus de cent kilomètres et de donner l'alerte à temps.

Notons au passage que les Allemands ont par la suite utilisé les signaux du « *Chain Home* » pour réaliser le premier radar passif de l'histoire (appelé le « Petit parasite de Heidelberg »), utilisant la différence de temps entre le signal direct en provenance d'Angleterre et celui renvoyé par les avions.

Toute contre-mesure appelant une contre-contre-mesure, le besoin de protéger les avions contre la détection à distance a mené finalement à la furtivité.

1.2 Historique

1.2.1 Camouflage

Le moyen le plus simple pour rendre un avion moins visible est le camouflage : l'objectif étant de réduire le contraste entre le fond et la couleur de l'avion, les constructeurs ont rapidement choisi des teintes foncées pour les bombardiers de nuit (mates pour ne pas refléter les faisceaux des projecteurs à terre) vers la fin de la

première guerre mondiale, puis des livrées bleues voire roses pour se confondre avec le ciel. Certains avions étaient bruns ou kakis en face supérieure et bleus en dessous. Ces teintes peuvent dépendre du pays ou de la mission : blanc, si le sol est enneigé, bleu ou gris, pour des chasseurs à haute et basse altitude.

1.2.2 Diminution des émissions et de la condensation

Les traînées que laissent les avions à haute altitude sont dues à la condensation de l'eau issue des gaz d'échappements. Elles apparaissent au-delà de 8 km d'altitude en moyenne et pour des températures inférieures à -40°C dans un air humide.

La fumée des réacteurs peut parfois être très visible et trahir, comme la condensation, la présence d'un avion, ce qui peut être un handicap lors d'un combat aérien. Les réacteurs actuels émettent beaucoup moins de fumée qu'autrefois, sauf en cas de post-combustion.

1.2.3 Contre-mesures visuelles

Le camouflage des avions était une étape vers la furtivité, il s'est accompagné de mesures de tromperie concernant les installations et infrastructures militaires. Cela a été illustré notamment pendant la guerre en Irak : camouflage des bases aériennes, ou utilisation de faux décors visant à attirer vers de fausses installations.

1.2.4 Évidence

Il est évident que la furtivité est un objectif militaire, principalement appliqué aux engins volants (avions et missiles), bien qu'il ait été étendu par la suite à d'autres objets. Sauf mention spécifique, le reste de cet article concerne donc l'aviation.

Notons au passage qu'un avion d'affaire Learjet s'est fait remarquer dans les années 1990 par sa furtivité : ses formes aérodynamiques arrondies lui conféraient involontairement une très faible signature radar.

1.3 Études américaines

Les premiers avions que l'on puisse qualifier de « furtifs » étaient le Lockheed U2 et le Lockheed SR71 « *Blackbird* », deux avions espions américains volant à très haute altitude (au-delà de 20 000 m). La furtivité de l'U2, toute relative, lui était conférée par sa haute altitude de croisière qui le rendait inaccessible aux défenses anti-aériennes. Ses formes étaient épurées, très longilignes et cylindriques, à l'opposé de celles du SR71 (figure 1) dont le fuselage participait à la portance et à sa grande vitesse (jusqu'à Mach 3). Même s'il ne faisait pas partie d'un programme d'avions furtifs, il en jetait certaines bases : bords effilés, intrados plat, ailerons inclinés.

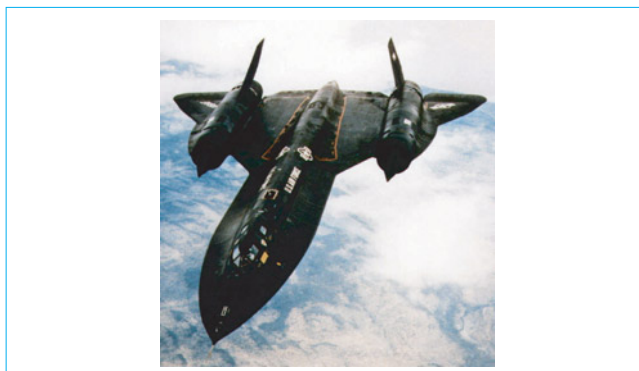


Figure 1 – Lockheed SR71 « *Blackbird* »



Figure 2 – F117 et B2

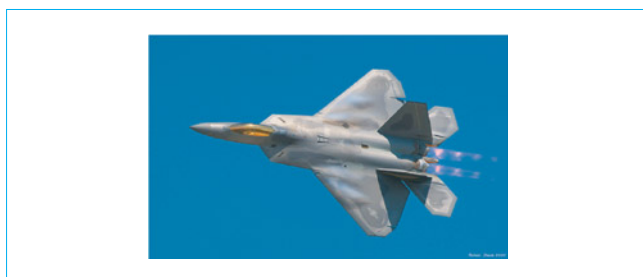


Figure 3 – Lockheed Martin F-22 Raptor

Le SR71 est cependant issu du programme américain « *Skunk Works* » lancé par Lockheed Martin en 1943 pour la conception d'un avion capable de rivaliser avec les chasseurs Messerschmitt allemands. C'est cependant au milieu des années 1970 que le prototype « *Have Blue* » a été conçu, pour tester les premiers principes de furtivité. Il a donné naissance au fameux F117 Night Hawk (voir paragraphe 4) sorti d'usine en 1981.

Dans les années 1980, Northrop a conçu le premier bombardier furtif, le B2 Spirit, aux formes très différentes, proches de celles d'une aile volante.

La figure 2 permet de comparer ces deux avions : leur conception présente des points communs qui contribuent à leur furtivité. L'intrados de l'avion est globalement dans un même plan pour réfléchir l'onde radar venant du sol dans une autre direction, l'aile semble faire partie du fuselage et son bord d'attaque forme un angle assez fermé, le bord de fuite est en dents de scie, les entrées d'air sont sur le dessus de l'avion... On note aussi des différences assez importantes : le F117 est tout en facettes alors que la forme du B2 est très arrondie, le B2 n'a pas de dérives, etc. Cela permet de voir qu'il existe plusieurs « recettes » pour concevoir un avion furtif, qui peuvent dépendre de la mission de l'avion.

Un autre avion furtif bien connu est le F22 Raptor, chasseur supersonique (le F117 est subsonique) pouvant dépasser Mach 2, en service à l'US Air Force depuis le début des années 1990. Il est conçu pour réduire aussi bien sa signature radar qu'infrarouge. La figure 3 montre qu'il est d'une conception globalement assez différente bien que les principales « recettes » soient utilisées.

Ces recettes de furtivité seront détaillées au paragraphe 3.

1.4 Comment la furtivité change-t-elle le champ de bataille ?

Un territoire est classiquement défendu par une première ligne de radars d'alerte lointaine, censés détecter une menace suffisamment tôt pour que les défenses (missiles ou chasseurs)

puissent se préparer et intercepter l'attaquant. Le principe de la furtivité est de diminuer la SER (*Surface Equivalent Radar*, voir paragraphe 2.1) d'un objet afin qu'il soit détecté le plus tard possible par les radars.

En effet, la SER est reliée directement à la portée du radar (voir paragraphe 2.2) : la diminution de SER d'un facteur A entraîne une diminution de la portée du radar d'un facteur $A^{0,25}$ (racine quatrième). Ainsi, un facteur 10 de diminution de SER réduira la portée d'un coefficient 0,56 (– 44 %), un facteur 100 donnera 0,32 (– 68 %) et un facteur 1 000 donnera 0,18 (– 82 %).

Ces valeurs ne sont pas anodines : un chasseur non furtif a une SER de l'ordre de 5 m^2 , et celle du F117 est estimée à $0,025 \text{ m}^2$, soit une diminution de $A = 200$, ce qui réduit la distance de détection du radar de près de 75 %.

D'une manière générale, l'effet sur la distance de détection doit aussi prendre en compte d'autres facteurs, comme les échos de fouillis, la pureté spectrale du radar, etc.

Dans tous les cas, un objet furtif est donc décelé bien plus tard qu'un objet non furtif. Le temps imparti à la réaction de la défense est plus court, voire peut rendre cette défense inutile. Ainsi, on parle souvent de la portée maximale d'un missile (distance maximale à laquelle il peut intercepter sa cible), mais pas de sa portée minimale. Or, ce paramètre, dû au temps nécessaire pour acquérir et fixer la cible, puis atteindre la vitesse de croisière et lancer le guidage, est fondamental si la cible est très proche.

Sur un champ de bataille protégé par des radars de diverses natures, un avion ou un missile furtif peut théoriquement éviter et atteindre sa cible sans être détecté suffisamment tôt pour être inquiété. L'avantage est amplifié si l'objet furtif est supersonique, rendant quasiment caduque la défense, car elle n'aura pas le temps de réagir efficacement.

2. Théorie

2.1 Définitions

La SER (Surface Équivalente Radar, en anglais RCS : *Radar Cross Section*, souvent notée σ) est une grandeur (exprimée en m^2) qui caractérise la capacité d'un objet à renvoyer l'énergie d'une onde électromagnétique incidente. Une onde radar électromagnétique, qui arrive sur une cible (avion, missile) interagit avec cet objet qui renvoie l'énergie incidente dans diverses directions, dont la direction incidente. Si le radar récepteur est aussi le radar émetteur, on parle de configuration monostatique ou de rétrodiffusion, sinon de configuration bistatique ou multistatique.

L'onde électromagnétique incidente est caractérisée par diverses grandeurs, parmi lesquelles sa fréquence ou son spectre de fréquence, sa polarisation (linéaire, circulaire ou elliptique).

La figure 4 montre l'évolution des vecteurs champs électrique et magnétique dans le temps en polarisation linéaire. L'interaction de l'onde avec la cible dépendra de sa polarisation.

Par définition, la SER d'un objet vaut 4π fois le rapport entre la puissance par unité d'angle solide diffusée dans une direction donnée sur la puissance par unité de surface d'une onde plane incidente sur cet objet depuis une direction donnée (IEEE STD 686-1997). Plus précisément, c'est la limite de cette valeur lorsque la distance entre la mesure et l'objet tend vers l'infini. Elle s'exprime par la formule :

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$$

où R est la distance à l'objet, E_s et E_i les champs électriques diffusé et incident. Le champ diffusé varie en $1/R$ ce qui implique un facteur R^2 au dénominateur qui annule en principe celui de la limite.

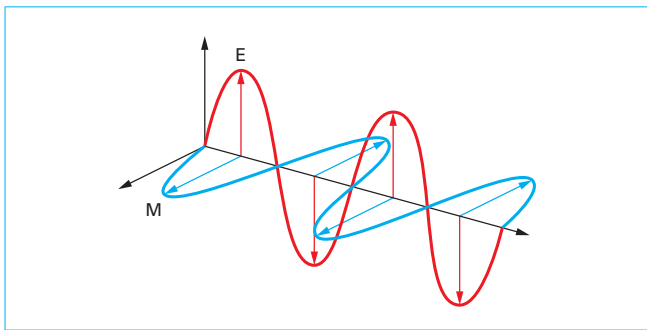


Figure 4 – Polarisation linéaire

On suppose que R est très grand, ce qui permet d'approximer l'onde radar à une onde plane et ainsi de simplifier les calculs ou les mesures. Dans le vide, elle se propage à la vitesse de la lumière, et est composée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H formant un trièdre avec le vecteur k de propagation. Le rapport entre E et H représente l'impédance intrinsèque du milieu, qui vaut 377Ω dans le vide.

L'équation précédente montre que la SER est homogène à une surface, elle s'exprime donc en m^2 mais on utilise régulièrement l'unité $dB \cdot m^2$, ce qui est plus facile pour une grandeur qui peut varier considérablement.

$$\sigma_{db.m^2} = 10 \cdot \log_{10} \sigma_{m^2}$$

Dans ce document, on écrira « j » la racine carrée de -1 .

2.2 Équations du radar

2.2.1 Radars de veille (et alerte transhorizon), radars embarqués

L'écriture du bilan de puissance d'un radar fait explicitement apparaître la SER de la cible :

$$P_R = \frac{P_E G_E}{4\pi \|R_E\|^2} \sigma \frac{1}{4\pi \|R_R\|^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$$

On se place dans le cas général où le radar d'émission et le radar de réception sont distincts. P_E et P_R sont les puissances émises et reçues, G_E et G_R sont les gains d'antennes, R_E et R_R sont les distances à la cible, λ est la longueur d'onde.

L'expression à droite est formée de quatre termes : le premier traduit le parcours direct de l'onde du radar vers la cible, le second est la SER de la cible, le troisième traduit le parcours retour, et le quatrième la captation d'énergie par l'antenne réceptrice (surface efficace).

2.2.2 Monostatique et multistatique

L'équation précédente est générale. Si l'on se place dans le cas monostatique – le radar d'émission est le même que celui de réception, l'équation se simplifie :

$$P_R = \frac{P_E G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma$$

On peut alors obtenir la portée du radar :

$$R = 4 \sqrt{\frac{P_R G^2 \lambda^2 \sigma}{P_E (4\pi)^3}}$$

On retrouve donc ici la relation entre la SER et la portée du radar, déjà annoncée au chapitre 2.1.

2.3 Phénomènes d'interaction onde radar et cible

D'un point de vue électromagnétique, l'interaction d'une onde avec un objet se fait par la création de courants en surface de l'objet, qui vont eux-mêmes générer une ou plusieurs ondes qui vont se propager dans toutes les directions et donc revenir vers le radar.

2.3.1 Décomposition de la cible

En première approximation, une onde électromagnétique interagit avec un objet selon le rapport entre ses dimensions et la longueur d'onde. La figure 4 montre deux périodes d'une onde monochromatique. La longueur d'onde est la distance séparant deux points identiques d'une onde, elle est reliée à la période T et à la fréquence f par :

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

où v est la vitesse de propagation (dans le vide, $v = c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Si l'objet est grand par rapport à la longueur d'onde, on est en haute fréquence et l'onde interagit de manière locale avec l'objet. On peut alors le décomposer en parties plus simples (un avion se divise en un fuselage, des ailes, un empennage, un cockpit, des réacteurs, etc.) que l'on pourra étudier séparément, puis recomposer l'onde renvoyée par l'objet en entier. Dans cette zone de haute fréquence, on identifie trois principaux phénomènes d'interaction : la réflexion spéculaire, la diffraction et l'onde rampante.

2.3.2 Réflexion

La réflexion spéculaire est celle qui obéit aux lois de Snell Descartes : l'onde se réfléchit sur la surface de l'objet avec un angle par rapport à la normale opposé à l'angle d'incidence (figure 5). Si l'objet n'est pas métallique, l'onde peut être atténuée lors de sa réflexion.

Une onde réfléchie peut se propager vers d'autres parties de l'objet et donner lieu à des interactions multiples.

2.3.3 Diffraction et trajets multiples

On appelle ici diffraction l'interaction de l'onde avec un objet localement non plan : un demi-plan, un dièdre (une arête), un trièdre ou une pointe (figure 6). Un rayon incident sur une arête se réfléchit selon un cône d'ouverture égal à l'angle d'incidence de l'onde (cône de Keller).

Cette interaction produit des rayons diffractés multiples qui peuvent aussi interagir avec d'autres parties de l'objet considéré : on parle alors de diffraction multiple.

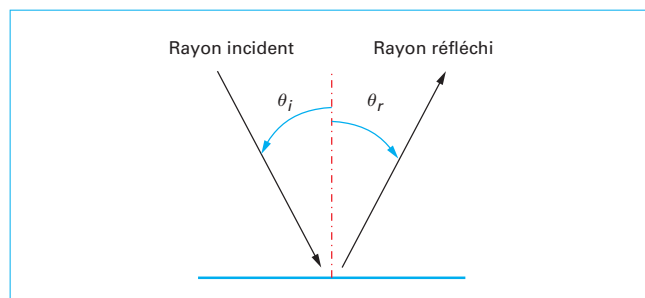


Figure 5 – Schéma de la réflexion d'une onde

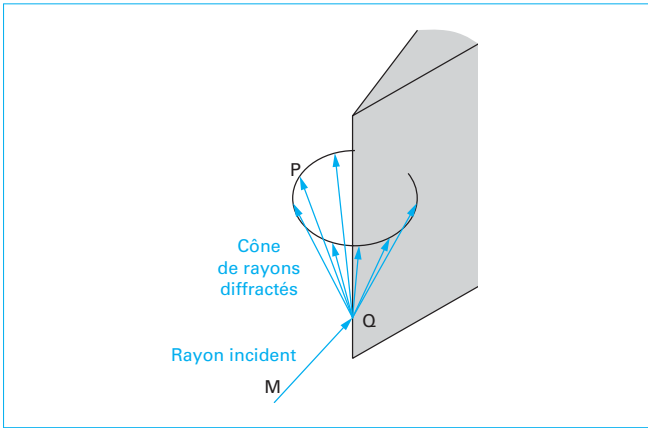


Figure 6 – Diffraction par un dièdre

2.3.4 Onde rampante

Ce phénomène apparaît dès la zone de résonance (voir paragraphe 2.4.1) lorsque l’onde s’attache à la surface de l’objet et se propage sur cette surface avant de re-rayonner vers l’extérieur (un rayon peut aussi ramper sur une arête, mais c’est assez rare). Elle peut ainsi contourner totalement l’objet et revenir dans la direction d’incidence sans que ce phénomène soit de la réflexion.

Un rayon rampant peut être issu directement de l’onde incidente, mais aussi d’une onde réfléchie par une surface ou diffractée par une arête ou une pointe. Réciproquement, une onde rampante peut se « décoller » de la surface pour se réfléchir ou être diffractée plus loin sur son chemin.

Les ondes rampantes existent aussi en zone optique, mais tendent à décroître avec la fréquence.

2.4 Modèles et calcul de SER

2.4.1 Trois zones (Rayleigh, résonance, asymptotique)

Une onde interagit très peu avec un objet très petit par rapport à la longueur d’onde : dans ce cas, sa SER est très faible, mais elle croît très vite lorsque la fréquence augmente (ou que la longueur d’onde diminue) :

$\sigma \sim f^4$

Dans le cas d’une sphère métallique de rayon *a* :

$\sigma \sim f^4 a^6$

C’est la zone de Rayleigh, caractérisée par le fait que l’objet est illuminé de façon homogène sur toute sa surface éclairée. La cible est équivalente à un dipôle qui diffuse un champ électrique en *f*².

Lorsque l’objet est de dimensions proches de la longueur d’onde, on parle de la zone de résonance : la phase du champ incident varie à la surface de l’objet, ce qui initie des phénomènes de réflexion et d’ondes rampantes. La SER est quasi constante.

Lorsque l’objet est grand devant la longueur d’onde, l’onde n’interagit plus avec l’objet de manière globale, elle interagit avec les diverses parties de l’objet. La SER de l’objet est la composition des SER des diverses parties qui renvoient l’onde (voir paragraphe 2.5.2) : on parle de points brillants. C’est la zone optique ou zone asymptotique.

Le tableau 1 résume cette dépendance. Les radars militaires ont leur fréquence située depuis la bande VHF (100 MHz) jusqu’à la bande Ka (30-40 GHz) et parfois au-delà (figure 7). Les radars transhorizon peuvent descendre à quelques dizaines de MHz ; les radars longue portée sont en VHF, UHF, en bandes L ou S ; les autodirecteurs de missiles en bandes X et K.

Tableau 1 – Dépendance de la SER aux paramètres de l’onde radar		
Zone	SER	Dimensions
Rayleigh	<i>f</i> ⁴	<< <i>λ</i>
Résonance	<i>f</i> ⁰	<i>λ</i> /3 < <i>D</i> < 5 <i>λ</i>
Optique	Selon l’objet	>> <i>λ</i>

2.4.2 Objets canoniques (sphère, cylindre, cône, demi-plan et dièdre, plaque plane)

Il existe plusieurs moyens de calculer la SER d’un objet (voir plus bas, paragraphe 2.4.3) à partir des équations de Maxwell. Pour certains objets canoniques, des résultats exacts ou approchés existent, qui permettent une approche simple de la compréhension des phénomènes mis en jeu.

La SER d’une sphère métallique ou homogène peut se calculer de manière exacte avec les séries de Mie, qui sont des séries infinies utilisant les fonctions de Bessel et de Hankel. La figure 8 montre l’allure de la SER d’une sphère métallique en fonction du rapport entre le rayon et la longueur d’onde. Pour une géométrie donnée, l’abscisse est proportionnelle à la fréquence.

On retrouve les trois régimes : basses fréquences, résonance et hautes fréquences. Ce dernier est caractérisé par deux phénomènes : réflexion spéculaire et onde rampante qui contourne la sphère. Le champ diffusé est donc la somme des deux champs qui interfèrent et créent les oscillations amorties de

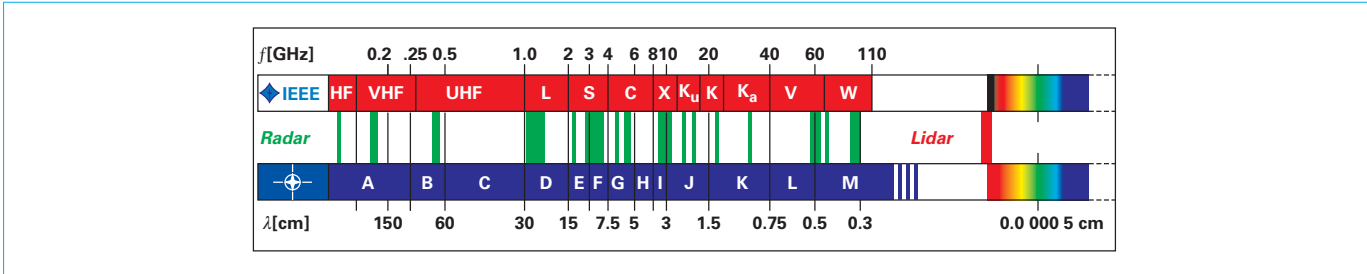


Figure 7 – Bandes de fréquences radar

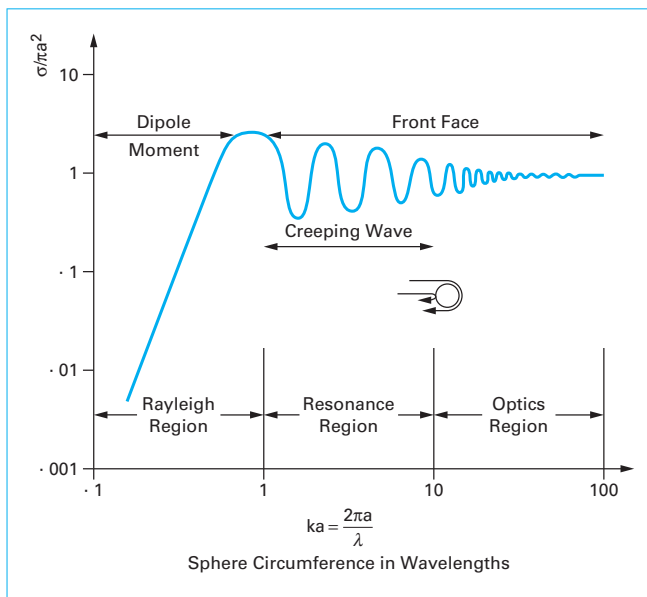


Figure 8 – SER d'une sphère en fonction du rapport a/λ
(tiré de « Radar Cross Section », Knott)

la SER. Le champ réfléchi crée une composante constante de la SER égale à :

$$\sigma = \pi a^2$$

alors que le champ issu de l'onde rampante décroît en $1/f^2$.

Le cas du cylindre est similaire, mais si l'on considère le cylindre métallique de longueur infinie, on parle de LER (longueur équivalente radar) : elle varie de manière semblable à la figure 8 et tend vers πa (a étant le rayon du cylindre) à très haute fréquence.

De manière générale, pour des objets de grande extension selon une direction (aile d'avion, fuselage), on peut se rapprocher d'objet canonique infini, dont on calcule non plus la SER mais la LER (longueur équivalente radar). Connaissant cette LER, il est possible de revenir à la SER pour cet objet tronqué d'une longueur L , par la formule :

$$SER = LER \cdot \frac{2L^2}{\lambda}$$

Ce calcul permet de donner une idée de la SER d'un fuselage d'avion ou de missile.

Un autre objet canonique très étudié est le demi-plan, représentatif, par exemple, d'un bord de fuite d'aile. La diffraction d'une onde électromagnétique par un demi-plan, dans le plan orthogonal, est connue depuis les travaux d'Arnold Sommerfeld, qui a calculé au début du XX^e siècle les coefficients de diffraction du demi-plan métallique parfait :

$$D_{\perp} = \frac{-\exp\left(\frac{-j\pi}{4}\right)}{2\sqrt{2\pi}} \left[\sec\left(\frac{\phi - \phi_i}{2}\right) - \sec\left(\frac{\phi + \phi_i}{2}\right) \right]$$

$$D_{\parallel} = \frac{-\exp\left(\frac{-j\pi}{4}\right)}{2\sqrt{2\pi}} \left[\sec\left(\frac{\phi - \phi_i}{2}\right) + \sec\left(\frac{\phi + \phi_i}{2}\right) \right]$$

où les angles sont selon la figure 9.

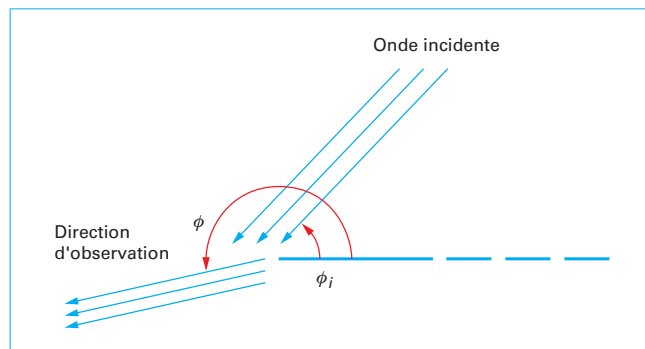


Figure 9 – Conventions d'angles

Ces résultats ont été étendus par la suite au demi-plan revêtu (par application d'une condition d'impédance) mais donnent des formules bien plus complexes.

Le champ diffracté se calcule à partir du coefficient de diffraction par :

$$E_{\perp,\parallel}^d = \frac{e^{-jkr}}{\sqrt{kr}} D_{\perp,\parallel}$$

D'autres formules similaires existent pour le dièdre métallique ou revêtu d'une condition d'impédance.

Ces formes simples, dites canoniques, permettent de prédire le comportement d'un objet ou de ses parties en présence d'une onde électromagnétique. Il est possible d'étendre ces résultats avec le principe de Babinet à des géométries dites complémentaires. Le principe de Babinet indique qu'on peut déduire l'interaction d'une onde avec un objet à partir de celle de son « complémentaire » en échangeant les champs E et H (électrique et magnétique).

Ainsi, selon ce principe, un dipôle et une fente sont des objets complémentaires.

2.4.3 Équations de Maxwell et leur résolution

Les lois décrivant le comportement des ondes électromagnétiques ont été établies par des scientifiques de renom, comme Faraday, Coulomb, Hertz, Ampère, mais c'est à James Clerk Maxwell que revient le mérite de les avoir rassemblées pour formuler les bases de la théorie électromagnétique.

Loi de Gauss : elle relie la source (densité de charge électrique) à la divergence du champ E :

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Loi de Faraday : elle exprime le champ électrique créé par la variation d'un champ magnétique :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Loi d'Ampère : elle décrit le champ magnétique créé par la densité de courant et la variation du champ électrique :

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t}$$

La dernière loi de Maxwell : elle exprime qu'il n'y a pas de source au champ magnétique, ses lignes de champ se referment sur elles-mêmes :

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ces équations, $D = \varepsilon E$ et $B = \mu H$, montrent que la variation d'un champ magnétique crée un champ électrique et la variation d'un champ électrique crée un champ magnétique.

Pour connaître la SER d'un objet, il faut calculer le champ rayonné par cet objet à l'infini lorsqu'il est éclairé par une onde incidente. Il existe plusieurs méthodes de résolution des équations de Maxwell pour arriver à ce résultat, citons les plus connues :

- Méthode intégrale et méthode des moments : à partir d'une formulation intégrale des équations de Maxwell (EFIE : *Electric Field Integral Equation*, ou MFIE : *Magnetic FIE*), la méthode des moments permet de calculer les courants induits puis les champs rayonnés grâce à un maillage de la surface ou du volume de l'objet considéré. La discrétisation des équations sur le maillage permet d'obtenir un problème matriciel que l'on va résoudre en le projetant sur une série de fonctions tests. Cette méthode utilise des matrices pleines et de faibles dimensions dont la taille croît comme le carré de la taille de l'objet maillé.

L'équation intégrale, dite de Chu Stratton EFIE, s'écrit :

$$E_s = \int_V (-j\omega \mu J \psi - M \times \nabla \psi + \frac{\rho}{\varepsilon} \nabla \psi) dV + \oint_S [-j\omega \mu (n \times H) \psi + (n \times E) \nabla \psi + (n \cdot E) \nabla \psi] dS$$

Elle indique comment les courants créés par le champ électromagnétique incident interagissent avec l'objet et entre eux, pour ensuite rayonner (via la fonction de Green ψ) et créer le champ diffracté.

- Solveurs différentiels (éléments finis, différences finies) : ces méthodes permettent de résoudre localement les équations de Maxwell sur le maillage d'un volume entourant l'objet considéré. Le champ total aux frontières de ce volume est ensuite utilisé pour calculer le champ rayonné à l'infini et en déduire la SER. La FDTD (*Finite Difference Time Domain*) a été introduite par K.S. Yee, en 1966. Elle discrétise les lois d'Ampère et de Faraday sur un maillage avec un schéma aux différences centrales sur lequel les champs E et H sont calculés avec un demi-pas en temps et en espace de décalage. On utilise souvent des conditions limites absorbantes pour tronquer le maillage et éviter que les frontières réémettent les champs vers le maillage (figure 10). En 1994, J.-P. Béranger a introduit un nouveau type de condition absorbante (PML : *Perfectly Matched Layer*) basées sur une modification des équations de Maxwell, en ajoutant un terme fictif de conductivité magnétique qui symétrise ces équations. Les méthodes différentielles aboutissent à la résolution d'un problème matriciel qui utilise des matrices de grande taille mais souvent peu denses.

2.4.4 Méthodes asymptotiques (PO, GTD...)

Au XVII^e siècle, Christian Huyghens a proposé un moyen de décrire la propagation d'une onde et d'en déterminer la forme des fronts d'onde. Le principe de Huyghens stipule que tout point d'un front d'onde peut être vu comme une source ponctuelle fictive émettant une onde semblable à l'onde initiale qui se propage de la même manière dans toutes les directions. Le front d'onde initial est l'enveloppe de tous les fronts d'onde secondaires au même instant (figure 11).

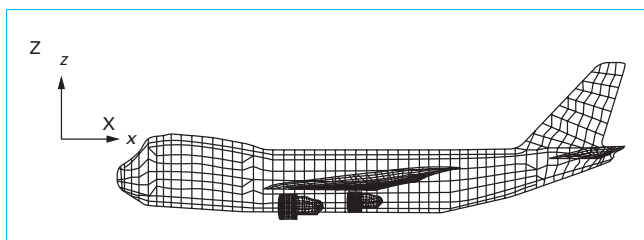


Figure 10 – Exemple de maillage d'un Boeing 747

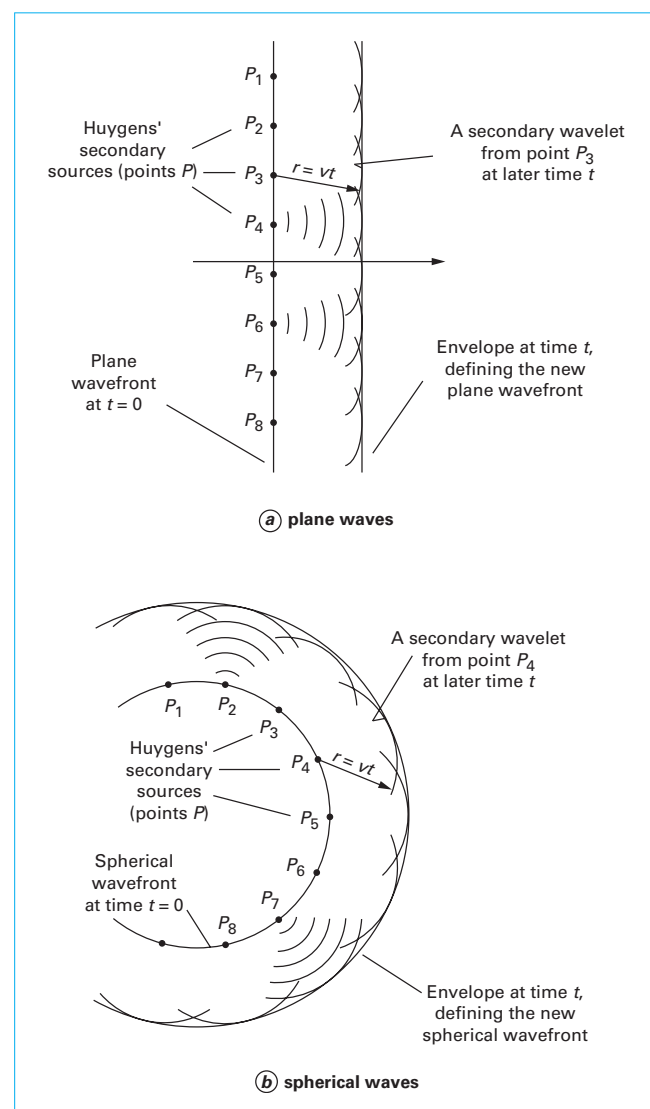


Figure 11 – Principe de Huyghens (tiré de « Basic physical optics », Pedrotti)

C'est la première méthode asymptotique de l'histoire de l'électromagnétisme.

Dans le cas du régime haute fréquence, lorsque la longueur d'onde est petite devant les grandeurs caractéristiques de l'objet, c'est-à-dire lorsque la phase de l'onde incidente oscille plusieurs fois sur la surface de l'objet, on peut faire des approximations qui simplifient le problème à résoudre et évitent d'utiliser les méthodes précédentes, assez lourdes et qui ne montrent pas les effets physiques mis en jeu.

La méthode de base est celle de l'optique géométrique, qui suppose que l'énergie se déplace le long des rayons, chemins de longueur minimum. C'est la limite à fréquence infinie, elle limite la diffraction à la réflexion spéculaire. Pour une surface courbe dont les rayons de courbure locaux principaux sont α_1 et α_2 au point de réflexion, elle calcule la SER par :

$$\sigma_{G0} = \pi \alpha_1 \alpha_2$$

Une surface plane ou avec une seule courbure donne une SER infinie, ce qui n'est pas possible.

Pour résoudre ce problème, on utilise l'optique physique. Sous l'hypothèse haute fréquence, on peut simplifier la MFIE de Chu Stratton et se ramener à une équation fondamentale :

$$H_S = \frac{-jke^{-jkr}}{4\pi r} \int_S J \times k_S e^{jkk_S r} dS$$

où S est la surface illuminée par l'onde incidente, $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde, k_S est le vecteur unitaire dans la direction de la diffraction, r la distance d'observation, et J la densité de courant de surface induit par le champ incident :

$$J = 2n \times H_i$$

L'optique physique calcule donc le champ diffracté par l'intégration des courants induits par l'optique géométrique.

Elle permet de calculer la SER d'une plaque plane de surface A , en incidence normale :

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2}$$

Et pour une surface avec une seule courbure R de longueur L :

$$\sigma = kRL^2$$

Lorsqu'on n'est plus en incidence normale, l'intégration fait apparaître des sinus cardinaux, par exemple, pour le cylindre :

$$\sigma = kRL^2 \left| \cos \theta_i \frac{\sin(kL \sin \theta_i)}{kL \sin \theta_i} \right|^2$$

où θ_i est l'angle d'incidence par rapport à la normale.

Cette méthode suppose une distribution de courant nulle dans la zone non illuminée, ce qui impose une discontinuité à la séparatrice ombre-lumière et entraîne des artefacts non physiques. Elle est cependant utile pour les objets ayant des parties convexes de grandes dimensions.

Ainsi, pour la SER d'une sphère, on obtient :

$$\sigma = \pi a^2 \left[1 - \frac{j}{2ka} e^{-2jka} + \frac{j}{2ka} \right]^2$$

Sur cette somme de trois termes, seuls les deux premiers correspondent effectivement à la SER, le troisième est dû à la discontinuité des courants à la frontière de la zone illuminée.

Pour améliorer les résultats, deux nouvelles méthodes ont été proposées : la GTD (*Geometrical Theory of Diffraction*, par Keller) et la PTD (*Physical Theory of Diffraction*, par Ufimtsev), qui sont des extensions de l'optique géométrique et de l'optique physique.

La GTD reprend les principes de l'optique géométrique et lui ajoute des rayons diffractés produits lorsque les rayons incidents arrivent sur des dièdres droits ou courbes, pointes, coins ou des frontières. (Cette méthode est proche de celles utilisées pour le rendu 3D des images de synthèse, avec en plus une approche physique bien établie.) Les champs sont calculés le long de ces rayons de la même manière que pour l'optique géométrique, mais en ajoutant un coefficient de diffraction pour les nouveaux rayons créés lors de ces interactions (voir, par exemple, la figure 6). Ces coefficients tendent vers 0 lorsque la fréquence tend vers l'infini. Le champ total en un point est la somme des champs des rayons passant par ce point. La GTD prend en compte les ondes rampantes, qui se forment lorsque la direction du champ incident est tangentielle à une surface. Les matériaux sont pris en compte par

l'utilisation de coefficients de réflexion et de transmission aux interfaces.

La PTD exprime le champ total comme la somme des champs incident, réfléchi (optique physique) et diffracté, calculé au niveau des arêtes en ajoutant un champ de frange généré par les discontinuités qui s'atténue en s'en éloignant. Elle marie certains avantages de l'optique physique et de la GTD, mais ne prend pas en compte les ondes rampantes ni les réflexions multiples. En pratique, on utilise de manière combinée ces différentes méthodes.

Ce sont les principes de la PTD qui ont conduit à la conception furtive du Lockheed F117.

Kouyoumjian et Pathak ont proposé une méthode unifiée (UTD) pour résoudre les problèmes de discontinuité de la GTD aux frontières de réflexion et d'ombre.

2.5 Simulation

2.5.1 Codes de calculs (éléments finis, méthode des moments)

Les différentes méthodes de calcul de SER à partir des équations de Maxwell ont été présentées aux chapitres précédents. D'une manière générale, la précision des résultats dépend de la précision de représentation de la variation de la phase des ondes sur les objets. On considère qu'une densité de mailles ou de rayons de l'ordre de 10 par longueur d'onde est suffisante pour garantir une bonne précision, mais dans certains cas (comme lorsqu'il faut pouvoir observer des annulations précises de phénomènes en opposition de phase ou de petites variations sur des grandes quantités), il faut parfois augmenter ce chiffre à 25 voire 50.

Pour des codes éléments ou différences finies, ou équations intégrales, qui nécessitent un maillage surfacique ou volumique, on voit que le nombre de mailles peut devenir très élevé, surtout pour des objets de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde. Cela implique, d'une part, un fort besoin de taille mémoire et, d'autre part, des temps de calcul parfois très longs.

Pour un code équations intégrales, il suffit de mailler la surface de l'objet considéré, la taille mémoire est fonction de la puissance quatrième du nombre de mailles, le temps de calcul de la puissance sixième.

Les logiciels modernes utilisent souvent plusieurs méthodes de résolution des équations de Maxwell ou de calcul de SER, parfois couplées. Un objet métallique de petites dimensions sera calculé par équations intégrales résolues par la méthode des moments. Si l'objet est revêtu d'un matériau absorbant radar, on utilisera plutôt une résolution par éléments finis. Pour un objet de dimensions moyennes, la FMM (*Fast Multipole Method*) permet de diminuer les temps de calcul.

Si l'objet est de grandes dimensions, ces méthodes sont trop gourmandes en temps et taille mémoire : on préférera des méthodes asymptotiques (optique physique, GTD, PTD), qui pourront être couplées à une méthode intégrale si des petites portions de la cible doivent être prises en compte de manière précise.

2.5.2 Codes commerciaux

Des codes de calcul commerciaux peuvent être utilisés pour calculer une SER, en voici une liste :

- Ansoft HFSS : <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/> (domaine fréquentiel, différences finies) ;
- CST Microwave Studio : <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx> (domaines fréquentiel et temporel, différences finies) ;
- NEC (*Numerical Electromagnetics Code*) : <http://www.nec2.org/> (domaine fréquentiel équations intégrales) ;

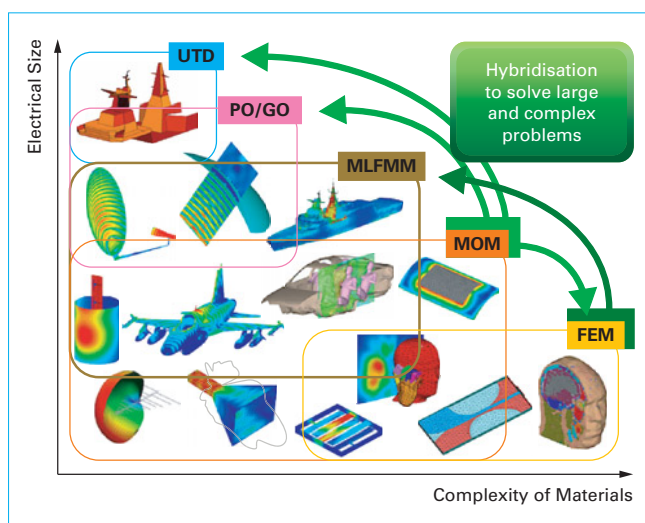


Figure 12 – Méthodes de calcul utilisées dans le logiciel FEKO

- Mentor Graphics IE3D : <http://www.mentor.com/electromagnetic-simulation/> (domaine fréquentiel, équations intégrales) ;
- IMACS Aseris : <http://imacs.polytechnique.fr/ASERIS.htm> (domaine temporel, différences finies ; domaine fréquentiel, équations intégrales) ;
- SAIC Xpatch : <http://www.saic.com/products/software/xpatch/> (domaines fréquentiel et temporel, équations intégrales, fast multipole method) ;
- Action et services : EMPIRE : <http://www.as-f.com/3.html> (domaine temporel, différences finies) ;
- Efield : <http://www.efieldsolutions.com/scattering.php> (couplage optique physique et équations intégrales, fast multipole method) ;
- CAST : <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/cast/index.html> (optique physique, PTD et équations intégrales) ;
- FEKO : http://www.feko.info/product-detail/numerical_methods (domaine fréquentiel, méthodes multiples, selon la taille de l'objet), une version gratuite existe (figure 12) ;
- Remcom XFDTD : <http://www.remcom.com/xf7> (domaine temporel, différences finies) (figure 13) ;
- CADRCS : <http://www.cadrcs.com/info.htm> (PTD, optique physique et lancer de rayons) ;

– Roke EPSILON : <http://www.roke.co.uk/epsilon/> (OG, GTD, OP, PTD, lancer de rayons) ;

2.5.3 Analyse de SER (points brillants, tracés, 2D)

La variable de base lorsque l'on calcule une SER est souvent le champ électrique, qui est homogène à la racine carrée de la SER. Le champ est un nombre complexe dont la phase est reliée à la distance de propagation. Lorsque plusieurs phénomènes apparaissent, on doit donc faire la somme cohérente des champs, ce qui revient à exprimer la SER comme une somme :

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} e^{-2jkr_i} \right|^2$$

On a vu qu'en haute fréquence, l'interaction du champ avec l'objet devient locale. On peut donc faire l'opération inverse si l'on connaît la SER : remonter aux différentes contributions locales des parties de l'objet considéré (« points brillants »). Cette analyse permet d'identifier les principaux contributeurs pour pouvoir en diminuer la SER (paragraphe 3), en commençant par le plus fort.

L'analyse permettant la décomposition en points brillants se base le plus souvent sur la transformée de Fourier. Le radar envoie un signal fréquentiel, la variable de Fourier associée est donc le temps, que l'on transforme en distance connaissant la vitesse de propagation des ondes dans l'air :

$$d = \frac{ct}{2}$$

Le facteur 2 est utilisé pour prendre en compte le trajet aller-retour.

La transformée de Fourier d'un balayage fréquentiel de SER sur une bande Δf (appelée réponse impulsionnelle ou RI) permet donc de positionner les points brillants en distance le long de l'axe de visée du radar. La figure 14 montre la RI d'une sphère, composée (comme on le sait depuis le chapitre 2.4.2) de deux points brillants : la réflexion de l'onde sur la sphère (dite réflexion spéculaire) et l'onde rampante, située légèrement plus loin que l'arrière de la sphère. En effet, si l'on place une origine à l'avant de la sphère, l'onde rampante s'accroche au niveau de la frontière ombre-lumière, rampe sur la partie non éclairée et se décroche à la frontière pour revenir vers le radar. Son trajet est donc plus long que celui de la réflexion spéculaire d'une distance de $2R + \pi R$, ce qui positionne le pic à $R(1 + \pi/2)$, soit près d'un demi-rayon derrière la sphère.

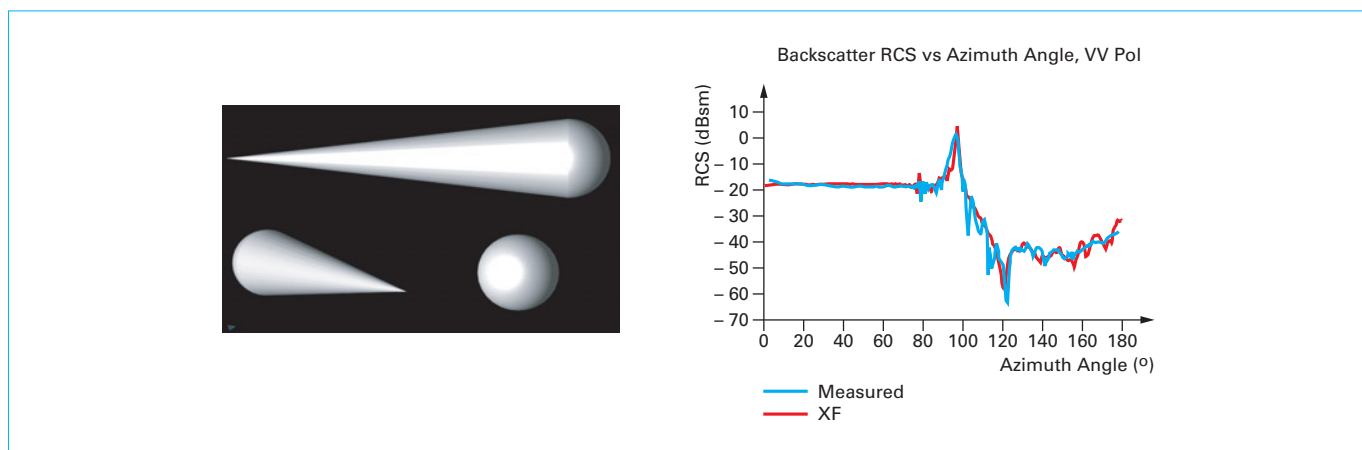


Figure 13 – SER en rétrodiffusion d'un cône – sphère à 9 GHz, comparaison calcul XFDTD et mesure (courtesy Remcom)

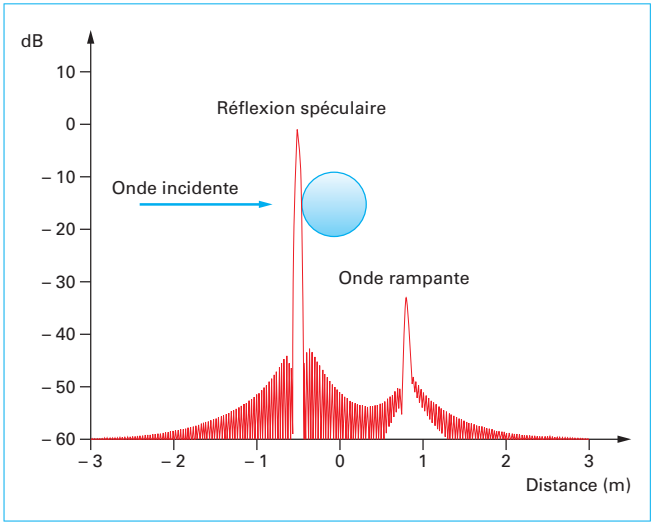


Figure 14 – Réponse impulsionnelle de la sphère

La résolution en distance (pouvoir de séparation de deux pics proches) vaut $c/2\Delta f$, et la périodicité du motif en distance est de $c/2\delta f$ où δf est le pas en fréquence $\delta f = \Delta f/N$, N étant le nombre de fréquences dans la bande considérée.

On voit que l'amplitude de la réflexion spéculaire est bien supérieure à celle du rampant, ce qui est dû au fait que la réflexion est d'amplitude constante (πR^2) alors que le rampant décroît selon le carré de la fréquence.

Cette rampe fréquentielle peut être obtenue par mesure ou par calcul. Si l'on dispose d'un balayage angulaire, la transformée de Fourier permet de positionner les points brillants en distance sur l'axe orthogonal à la direction moyenne du balayage. Cette analyse est assez peu précise car la variation de l'angle d'éclairement fait bouger les points brillants : le résultat est « flou ».

Enfin, un double balayage en fréquence et en angle permet d'obtenir par transformée de Fourier bidimensionnelle une image (appelée holographie) positionnant les points brillants sur la surface de l'objet, autour de la direction moyenne d'illumination.

La figure 15 montre une holographie pour un Boeing 747 autour de 60° d'incidence (l'onde incidente vient du haut de la figure) dans la bande 20-40 MHz. On voit notamment pour la polarisation dite HH (champ électrique incident horizontal, réception sur champ électrique horizontal) en haut à gauche la réflexion spéculaire sur le bord d'attaque de l'aile gauche, ainsi que celle sur le cockpit en HH et VV.

2.6 Dépendance de la SER aux paramètres

2.6.1 De l'onde (fréquence, angle d'incidence, polarisation)

On a vu que la SER dépend fortement de la fréquence de l'onde incidente, notamment par les trois régimes d'interaction du tableau 1. En haute fréquence, l'interaction devient locale et les divers types de contributeurs ont eux aussi une dépendance à la fréquence de l'onde :

- réflexion : SER varie comme le carré de la fréquence ;
- diffraction par une arête : SER indépendante de la fréquence ; $\sigma = L^2/\pi$ pour E parallèle à l'arête et $\Phi \approx 180^\circ$ (bord d'attaque,

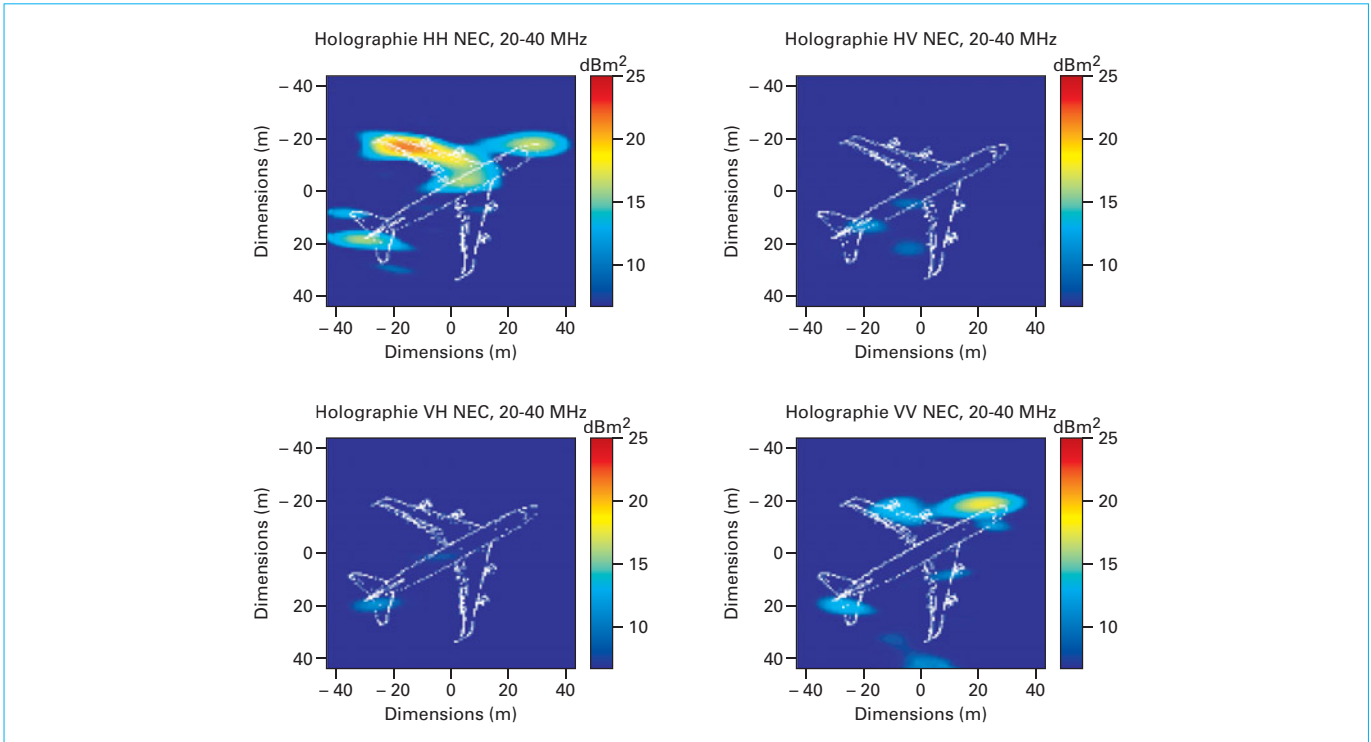


Figure 15 – Holographie du Boeing 747 (tiré de la thèse d'Arnaud David)

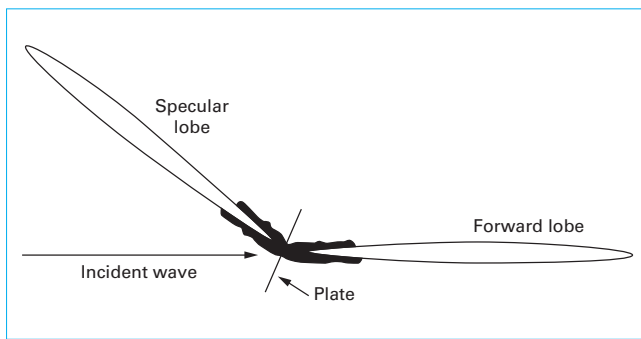


Figure 16 – Lobes de la SER bistatique d'une plaque plane
(tiré de « Radar Cross Section », Knott)

cf. figure 9) ou E perpendiculaire à l'arête et $\Phi \approx 0^\circ$ (bord de fuite) ; négligeable dans les autres cas de polarisation ;

- diffraction de pointe : SER varie comme l'inverse du carré de la fréquence, et comme la puissance quatrième du demi-angle au sommet ;

- dièdre concave : deux plaques planes à 90° forment un dièdre qui renvoie l'onde dans la direction d'incidence, ce qui donne une SER monostatique qui varie comme le carré de la fréquence sur une large gamme d'incidence (près de 45° de part et d'autre de l'angle médian). La SER monostatique d'une plaque seule n'est élevée qu'en incidence normale, pour les autres angles d'incidence, la plaque renvoie l'onde selon les lois de Snell Descartes ;

- trièdre : même chose mais dans l'ensemble de l'angle solide interne au trièdre ;

- onde rampante : SER varie comme l'inverse du carré de la fréquence.

La SER dépend aussi de la direction d'arrivée de l'onde sur la cible. Dans le cas d'une plaque plane, le lobe principal de réflexion est plus étroit si la fréquence augmente ou si le produit $k\ell$ augmente (k étant le nombre d'onde et ℓ la largeur de la plaque). La figure 16 montre l'allure de la SER bistatique d'une plaque plane : les lobes sont très fins. En effet, la dépendance de la SER aux angles d'incidence et de diffusion est de l'ordre de :

$$\left(\frac{\sin [k\ell (\theta_i - \theta_s)/2]}{k\ell (\theta_i - \theta_s)/2} \right)^2$$

$\theta_i - \theta_s$ est la différence entre l'angle d'incidence et l'angle d'observation. Ainsi, pour $\ell/\lambda = 5$ soit $k\ell \approx 30$, le premier zéro du lobe de réflexion spéculaire est éloigné de seulement 10° de l'angle de réflexion parfaite (loi de Snell Descartes).

La figure 17 illustre la variation de la SER monostatique d'un Boeing 747 à 20 MHz dans un plan horizontal en fonction de l'angle d'incidence.

En bistatique « grand angle », proche de 180° , la SER est toujours très élevée. Cela correspond au masquage de l'onde incidente par l'objet, qui apporte donc un fort contraste par rapport au fond qui n'est autre que l'éclairement incident. La SER en bistatique à 180° (en anglais, *forward scattering*) est proportionnelle au carré de la surface apparente de l'obstacle, quel qu'il soit.

L'optique physique donne la formule suivante :

$$\sigma_{180^\circ} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}$$

où S est la surface de la plaque plane équivalente interceptant l'onde incidente (surface apparente de l'objet, limitée par la frontière ombre-lumière). C'est une approximation assez bonne, mais la dépendance fréquentielle peut être modifiée si certaines surfaces de l'objet sont parallèles à l'onde incidente : leur contribution

et celle de la diffraction à leurs arêtes augmentent la SER de quelques dB pour un objet allongé, voire ajoutent une dépendance linéaire avec la fréquence.

Enfin, le dernier paramètre de l'onde auquel la SER est sensible est la polarisation : cette sensibilité se voit particulièrement dans le cas de la diffraction par un demi-plan ou un dièdre (notamment pour un bord d'attaque ou de fuite d'aile). Si l'on se réfère aux conventions d'angles de la figure 9, lorsque l'angle incident est proche de π , l'arête diffracte fortement en rétrodiffusion si le champ électrique lui est parallèle (voir figure 15 en haut à gauche) ; si l'angle est proche de 0, l'arête diffracte fortement en rétrodiffusion si le champ électrique lui est orthogonal.

2.6.2 De la cible

Dans la zone de Rayleigh, lorsque la longueur d'onde est significativement plus grande que l'objet en son ensemble, sa SER est proportionnelle au carré de son volume :

$$\sigma \sim V^2 f^4$$

En haute fréquence, les paramètres de la cible pouvant influencer sur sa SER sont ses dimensions (globales et locales) et sa géométrie. La figure 19 illustre les différents mécanismes pouvant contribuer à la SER d'un objet complexe. Ces mécanismes sont liés à la morphologie de la cible.

Il peut donc y avoir de très nombreux mécanismes contributeurs à la SER d'un objet complexe, et leurs amplitudes dépendent des dimensions locales. On a vu par exemple que la SER monostatique en réflexion spéculaire sur la surface d'un cylindre est proportionnelle à son rayon et au carré de sa longueur, mais qu'elle décroît très vite (lobe étroit) lorsque l'incidence s'éloigne de la normale si la longueur d'onde est faible devant la longueur du cylindre. Il en est de même pour une plaque plane (intrados ou extrados d'une aile). Donc, sauf pour des cas très particuliers d'incidence de l'onde radar, la SER d'un avion est majoritairement composée de diffractions sur des arêtes ou des pointes.

La SER d'une arête diffractante est fonction du carré de sa longueur, celle d'une pointe de la puissance quatrième du demi-angle au sommet.

La pointe étant sans dimension, sa SER ne dépend que de la valeur de l'angle, mais la diffraction à la pointe peut créer une onde de surface qui rampe le long de la surface et peut ensuite se diffracter sur tout autre objet ou discontinuité sur son parcours.

D'une manière générale, chaque réflexion ou diffraction peut entraîner une réflexion ou diffraction supplémentaire sur une autre partie de l'objet considéré, pouvant parfois avoir une SER supérieure à celle du mécanisme initial.

Certaines géométries caractéristiques ont des SER très élevées sur de larges gammes d'incidence :

- un dièdre formé de deux plaques de surface S à 90° a une SER de :

$$\sigma = \frac{8\pi S^2}{\lambda^2}$$

- un trièdre rectangle formé de trois plaques carrées de côté L a une SER de :

$$\sigma = \frac{12\pi L^4}{\lambda^2}$$

Un dièdre à 90° peut se trouver entre la dérive et l'empennage vertical d'un avion. On évite les dièdres et trièdres rectangles si l'on veut concevoir un aéronef furtif. De manière similaire, une cavité peut avoir une SER très élevée (voir paragraphe 3.1.2).

Une discontinuité de courbure sur un profil métallique diffracte l'onde incidente, et donne une SER locale qui varie comme l'inverse du cube de la fréquence. De manière plus générale, une discontinuité géométrique d'ordre n donne une SER qui varie en f^{-2n+1} .

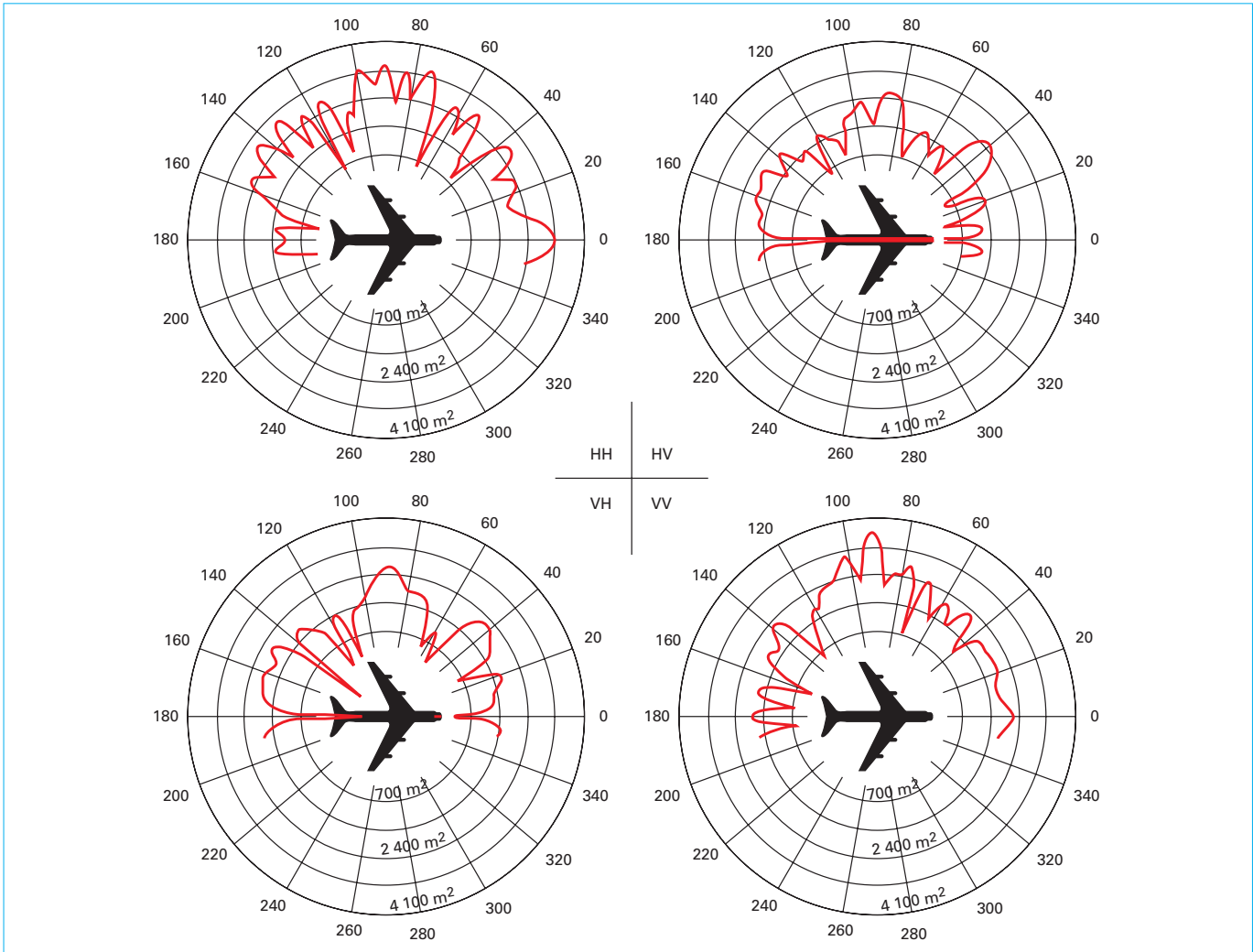


Figure 17 – SER d'un Boeing 747 en fonction de l'azimut à 20 MHz (tiré de la thèse d'Arnaud David)

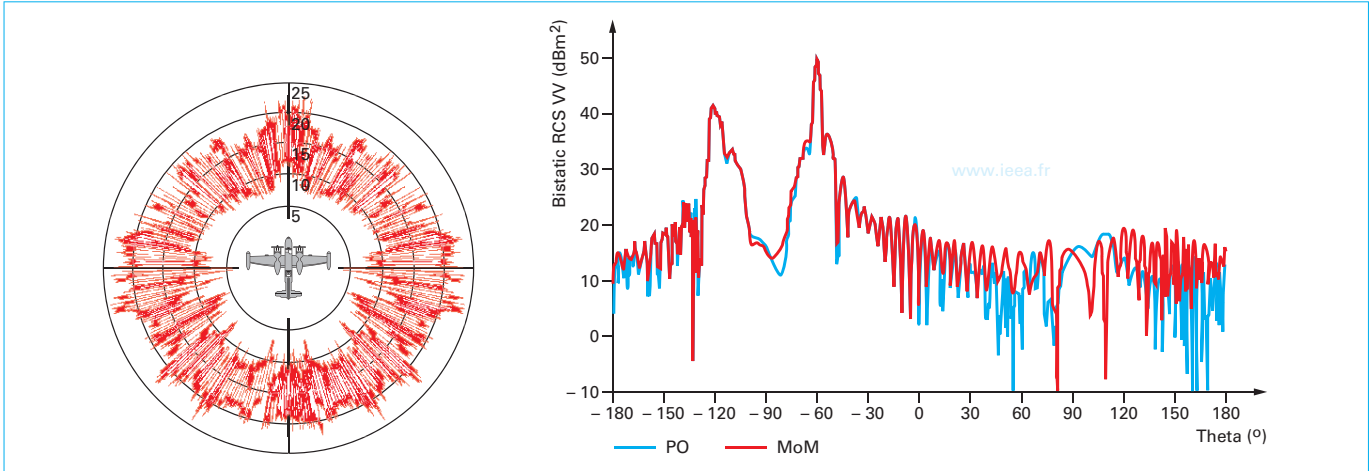


Figure 18 – SER d'un B26 à 3 GHz (mesure, tiré de Skolnik) et SER bistatique d'un F16 à 1 GHz (logiciels de IEEA)

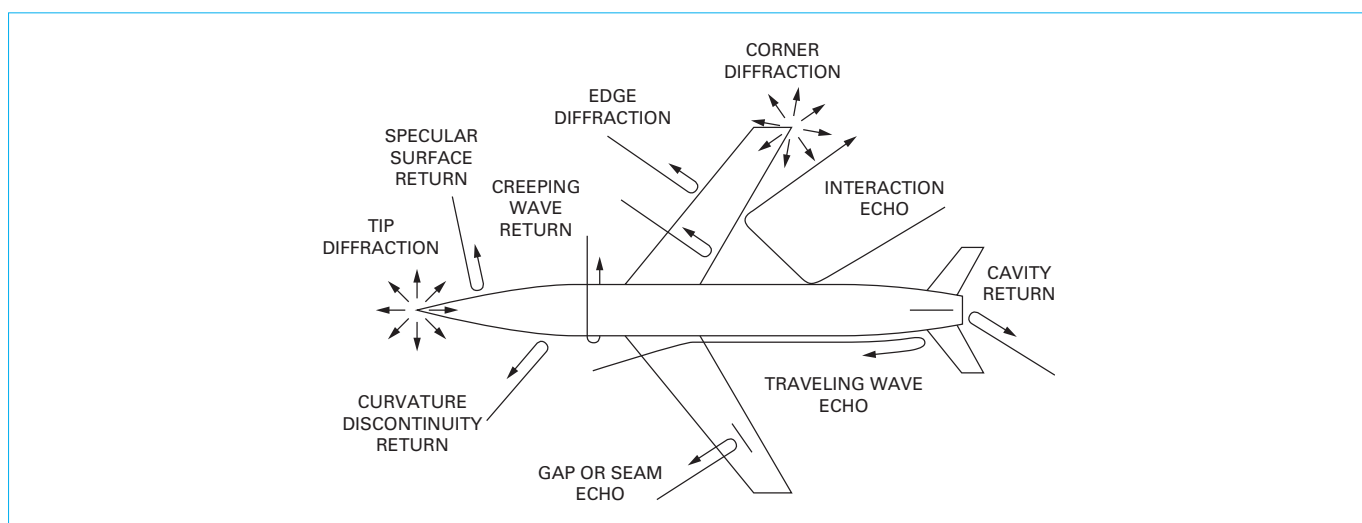


Figure 19 – Divers types d'échos renvoyés par une cible (tiré de « Radar Cross Section », Knott)

3. Conception d'un engin furtif

Un objet ne doit pas être furtif dans l'absolu, mais doit répondre à un ensemble de contraintes dont celle de la furtivité. Pour un avion, il s'agit bien sûr en premier lieu d'aérodynamique et de domaine de vol, de profils de missions, puis de furtivité. Il est assez rare que toutes ces contraintes soient entièrement compatibles.

Pour rendre un objet furtif, on peut agir sur sa forme, son revêtement ou utiliser des systèmes électroniques d'annulation d'écho. Nous allons aborder dans la suite ces divers points.

3.1 Forme

3.1.1 Plusieurs approches (facettes, arrondis)

Le F117 et le B2 ont des formes très différentes avec cependant quelques points communs. Le F117 est tout en facettes (on parle de forme en diamant) alors que le B2 est très arrondi (figure 20).

Le principe de furtivité du F117 est basé sur l'utilisation de surfaces planes de grandes dimensions, qui renvoient l'onde dans une autre direction que celle du radar (figure 16). Les radars concernés ont des fréquences au-delà du GHz, donc des longueurs d'ondes inférieures à 30 cm : la facettisation de l'avion crée des surfaces grandes devant ces longueurs d'ondes, qui renvoient les ondes avec des lobes de diffusion très étroits. Les orientations des surfaces sont choisies pour des raisons aérodynamiques mais aussi pour ne pas être orthogonales à des directions d'arrivée d'onde radar.

Le même principe est utilisé pour l'inclinaison des ailes par rapport à l'axe de l'avion (la flèche) : l'onde radar d'un chasseur ennemi arrivant de face serait renvoyée selon le cône de Keller (figure 6) dans une direction lointaine. L'inclinaison des dérives est différente de 90° afin d'éviter le phénomène d'amplification décrit au paragraphe 2.6.2).

Ce principe est repris au niveau des bords de fuite sur le F117 et le B2 (figure 21). La découpe en dents de scie permet de renvoyer l'onde dans des directions éloignées de la direction d'incidence.

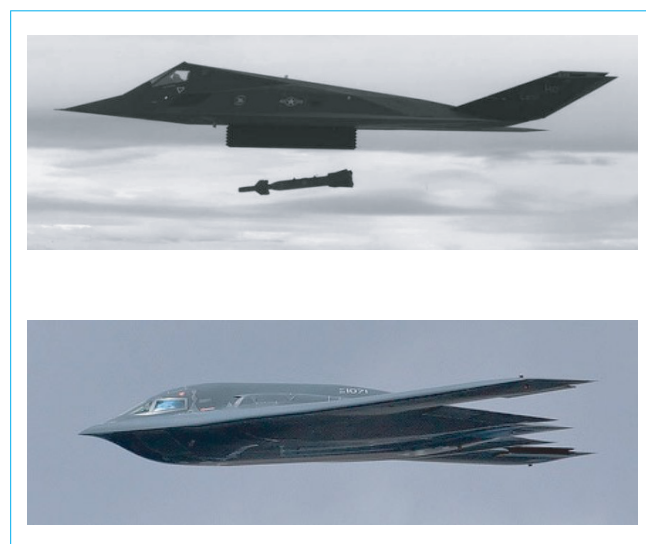


Figure 20 – Comparaison des formes de profil du F117 et du B2

Conçu dans les années 1970, le F117 est recouvert de matériaux absorbants (Fibaloxy, de Dow Chemical, voir paragraphe 3.2), matériaux encore peu performants à cette époque. Le B2 a bénéficié des avancées dans ce domaine. On estime que 80 % de la masse du B2 fait usage de matériaux composites absorbants radar en nid d'abeilles chargés avec du graphite (l'absorbant radar est alors aussi en partie structurant). La résine d'époxyde étant un isolant, l'onde incidente a beaucoup de mal à y induire un courant électrique et magnétique, ce qui diminue d'autant plus la SER du B2.

Outre son prix, ce matériau absorbant a cependant un point faible : il supporte mal les longues attentes au soleil et il a fallu développer des systèmes de maintenance très lourds pour entretenir une flotte de l'ordre de 80 B2.

La forme du B2 montre une autre approche de furtivité, basée non plus sur la réflexion (dont on a vu qu'elle crée des lobes

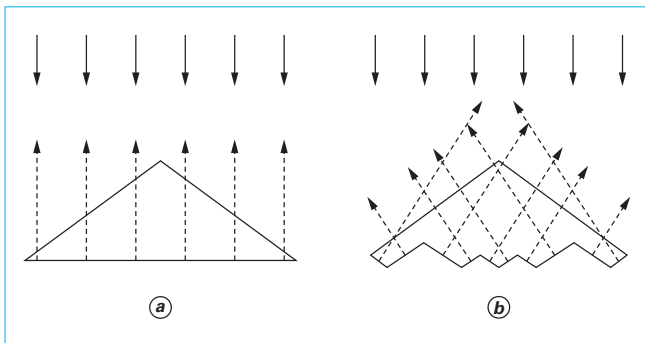


Figure 21 – Mécanismes de diffraction par des arêtes droites et en dents de scie (tiré de la thèse de Serge Stroobandt)

étroits mais de SER fortement croissante avec la fréquence) mais sur la diffusion des ondes. Le principe utilisé est celui des ondes rampantes qui s'atténuent avec la fréquence, en conservant une forme élancée pour éviter toute surface propre à renvoyer l'onde vers le radar émetteur. Ainsi, le B2 ne possède pas de surface verticale, ce qui le rend peu maniable. Toute jonction a été arrondie (« *blending* ») pour éviter les diffractions. Les rivets, fixations et prises d'air ont été traités avec soin voire éliminés, pour privilégier la soudure ou le collage.

Il est probable que l'effort sur la forme a porté sur l'élimination des discontinuités de courbure dont on a vu qu'elles ont une SER qui varie en f^{-3} .

Donc en résumé, pour rendre un objet furtif, il faut connaître les directions potentielles des ondes incidentes et éviter toute arête ou surface orthogonale à ces directions. Il faut aussi éviter les dièdres concaves à 90° , amortir les effets des cavités (voir paragraphe suivant) et réduire les discontinuités mathématiques dans la description des surfaces ou arêtes.

3.1.2 Cas des cavités

Un point commun de ces deux avions est la position des entrées d'air : elles sont situées au-dessus de l'avion (figure 2), contrairement à ce qui est fait d'ordinaire, afin de ne pas être

visibles par les radars au sol. La signature radar d'une cavité dépend de la taille de son ouverture par rapport à la longueur d'onde.

En basse fréquence, la longueur d'onde étant supérieure à la dimension de l'ouverture, l'onde ne pénètre pas à l'intérieur. Aux fréquences intermédiaires, les ondes vont se propager à l'intérieur de la cavité ou du conduit (la GTD, le lancer de rayons et la méthode modale permettent de calculer sa SER) et se réfléchir à l'interface avec le compresseur. À haute fréquence, l'interaction avec les pales du compresseur pourra moduler la SER par effet Doppler. On parle de « JEM » ou *Jet Engine Modulation*.

La figure 22 à gauche montre les trajets des rayons dans une cavité rectangulaire droite en fonction de l'angle d'incidence : certaines directions sont plus propices à une forte SER, car les rayons sont renvoyés dans la même direction. La partie droite montre qu'il est possible de réduire la SER en jouant sur la forme (en tordant le conduit) et en recouvrant les parois internes de matériau absorbant radar. On voit que la SER peut être très élevée, et que la courbure du conduit permet une forte diminution.

Ces recettes auraient été mises en œuvre sur le Rafale : le conduit d'air est courbé (l'entrée est plus basse que le compresseur) et ses parois seraient revêtues de matériau absorbant.

Le cockpit est un autre type de cavité, qui peut aussi fortement contribuer à la SER de l'avion, car les nombreux équipements qui le composent sont autant de réflecteurs potentiels de l'onde radar. La solution habituellement utilisée ici est différente, car il n'est pas envisageable de recouvrir les équipements de matériau absorbant. C'est la verrière qui est recouverte d'une très fine couche de métal, épaisse de quelques atomes (d'or, par exemple), elle renvoie les ondes radar comme un métal mais laisse passer la lumière sans gêner le pilote.

3.1.3 Problème des emports

Les avions, chasseurs ou bombardiers, doivent emporter une « charge utile », parfois sous les ailes ou sous le fuselage. Pour éviter que les emports ne dégradent la SER de l'ensemble, il faut bien sûr agir pour diminuer leur SER propre.

Dans le cas d'avions furtifs, F117 ou B2, il est impossible d'emporter des missiles sous l'avion, il faut tout mettre en soute. Les arêtes des trappes de soute ont alors été découpées en dents de scie (figure 23) pour diminuer leur contribution.

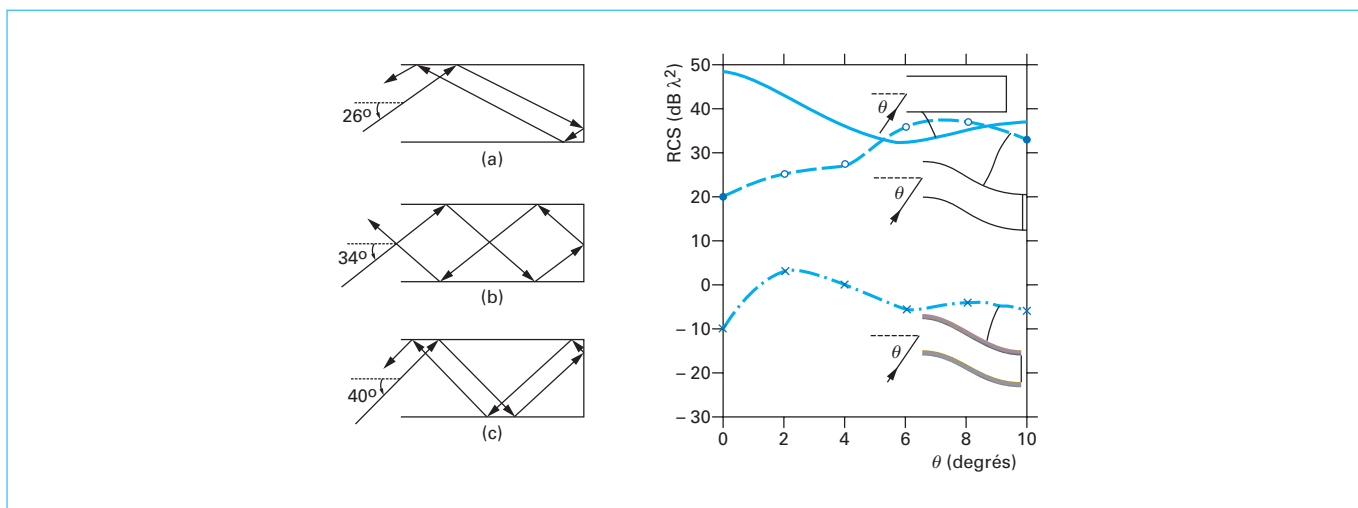


Figure 22 – Variation de la SER d'une entrée d'air rectiligne, tordue et recouverte d'absorbant



Figure 23 – Trappe de soute du F117

D'une manière générale, toute protubérance (boulon) doit être éliminée.

3.2 Matériaux absorbants

Un autre moyen de réduire la SER d'un objet est de le recouvrir d'un matériau absorbant les ondes radar. Un article des Techniques de l'Ingénieur leur est dédié (Matériaux en électromagnétisme – Matériaux absorbants radar par Alain Priou, [AF 3 372]). Nous ne ferons ici qu'un tour d'horizon rapide de ces matériaux et de leur utilisation.

3.2.1 Matériaux diélectriques et magnétiques

Du point de vue électromagnétique, un matériau est caractérisé par sa constante diélectrique (ou permittivité) $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ et sa perméabilité $\mu = \mu' + j\mu''$, qui sont des nombres complexes dépendant de la fréquence (la permittivité exprime le changement d'un matériau pour absorber l'énergie d'un champ électrique incident, la perméabilité est le degré de magnétisation d'un matériau en réponse à un champ magnétique). On parle de permittivité et perméabilité relatives ε_r et μ_r quand on les divise respectivement par

la permittivité du vide $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ et la perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$. La partie imaginaire de ces nombres est liée à l'absorption du champ électromagnétique (transformation en chaleur). Le rapport entre partie imaginaire et partie réelle est appelé (tangente de) l'angle de pertes.

Il existe divers modèles théoriques pour décrire l'évolution de ces grandeurs en fonction de la fréquence, les plus connus sont :

– le modèle de Debye : $\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{A}{1 + j\omega\tau}$ où τ est le temps de relaxation ;

– le modèle de Lorentz : $\varepsilon_r(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2j\gamma\omega}$, il caractérise un comportement résonant.

Ces modèles peuvent être utilisés dans les codes de calcul pour simuler un matériau absorbant.

3.2.2 Empilements absorbants (Salisbury, Jaumann et pyramidal, Dallenbach, absorbant accordé) et optimisation

Les matériaux absorbants radar sont utilisés en monocouches ou multicouches accordés ou large bande, les empilements les plus connus sont les suivants :

– écran de Salisbury : il est constitué d'un écran résistif (résistivité surfacique $377 \Omega/\square$) très fin déposé sur un espaceur (de permittivité relative proche de 1) d'épaisseur $\lambda/4$. Cet écran est donc accordé à la fréquence choisie et à ses harmoniques impaires : il absorbe donc sur une très faible bande de fréquence ;

– écran multicouche Jaumann : c'est un empilement d'écrans de Salisbury bien choisis pour élargir la bande fréquentielle d'absorption, au détriment de l'épaisseur. Un Jaumann absorbant entre 6 et 12 GHz peut avoir plus de 3 cm d'épaisseur ;

– écran de Dallenbach : c'est un matériau ou un empilement de matériaux homogènes déposés sur une référence métallique. On choisit les matériaux en fonction de la bande de fréquence à absorber (ferrite en UHF, polymère chargé de carbone ou de fer carbonylé en SHF), mais leur mise en œuvre répond à des règles bien précises. En général, un matériau est absorbant à une fréquence donnée (avec une certaine bande passante, souvent plus forte s'il a des pertes) et s'utilise à une épaisseur bien choisie (l'épaisseur d'accord). Tout matériau, même s'il présente des pertes diélectriques ou magnétiques, ne s'accorde pas forcément. Ces matériaux sont souvent des composites avec matrice céramique ou polymère (selon qu'on veut ou non leur donner des caractéristiques thermiques et mécaniques) chargée d'un ferro-électrique ou ferromagnétique : il sera ou non possible de l'utiliser en Dallenbach, et la fréquence et l'épaisseur d'accord dépendront du type de charge et du taux de charge.

Remarque

Il n'est pas étonnant de retrouver ici des matériaux utilisés en électronique pour réaliser des transformateurs ou des inductances.

Le principe d'un empilement accordé est d'obtenir en surface une impédance (rapport E/H) égale à l'impédance du vide (377Ω) ou une impédance réduite égale à 1 si l'on fait les calculs avec les permittivité et perméabilité relatives (ce qui est pris comme hypothèse par la suite). L'impédance de surface de l'empilement est calculée en fonction des paramètres des matériaux utilisés (permittivité, perméabilité, épaisseur) et de l'angle d'incidence et de la fréquence de l'onde considérée. Il est possible d'utiliser des codes d'optimisation (algorithme génétique, par exemple) pour trouver des empilements répondant à certaines contraintes de fréquence, d'épaisseur ou de masse.

En incidence normale, l'impédance de surface d'un monocouche d'épaisseur e sur un plan métallique vaut :

$$Z_1 = -j \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \tan\left(\frac{2\pi e}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}\right)$$

Si l'on ajoute une seconde couche, l'impédance deviendra :

$$Z_2 = \frac{Z_1 - j\eta_2 T_2}{1 - jZ_1 \frac{T_2}{\eta_2}}$$

avec $\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}$ et $T_2 = \tan\left(\frac{2\pi e_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}\right)$, et on peut ainsi empiler les couches...

Un autre principe est celui de l'absorption graduelle de l'onde dans l'épaisseur du ou des matériaux. On le retrouve dans l'empilement de Jaumann ainsi que dans les absorbants pyramidaux utilisés sur les parois des chambres anéchoïdes compactes. On fait varier l'indice des diverses couches d'une valeur proche de 1 à l'extérieur ($\varepsilon_r \approx \mu_r \approx 1$: la couche externe est « accordée » au vide ambiant donc ne crée pas de réflexion de l'onde à l'interface) à des valeurs plus grandes avec des matériaux à pertes qui dissipent l'énergie (on parle de gradient d'indice ou de gradient d'absorp-

tion). Plus on veut absorber en basse fréquence, plus les épaisseurs sont élevées : un absorbant de chambre anéchoïde pour la VHF peut faire près d'un mètre d'épaisseur !

3.2.2.1 Plasma

Une autre méthode de réduction de la SER d'un objet a été proposée dès 1956 : envelopper l'objet d'un plasma, dans lequel l'onde radar incidente se dissipe en créant de la chaleur. Si le principe et la théorie semblent simples, la mise en œuvre est autrement compliquée : il faudrait soit confiner le plasma autour de l'engin dans une enveloppe elle-même transparente aux ondes radar, soit créer le plasma continu à l'avant de l'objet afin qu'il l'entoure complètement.

Il semblerait que des chercheurs Russes aient conçu un générateur de plasma pesant moins de 100 kg, ce qui le rendrait « avionnable ». Des essais auraient été menés sur Mig 35 et Sukhoi 35 en 2002, obtenant une diminution de SER d'un facteur 100 (– 20 dB), mais aucune information officielle n'existe.

3.2.2.2 Structures nid d'abeille

Les structures des avions sont souvent faites de matériaux composites « nid d'abeille » (NIDA, ou « *Honeycomb* » en anglais), servant à en renforcer la résistance tout en garantissant une grande légèreté. Ces matériaux « pleins de vide » peuvent alors être utilisés comme matrice pour recevoir des charges ferro-électriques ou ferromagnétiques et gagner des propriétés absorbantes aux ondes radar.

Il est probable que cette solution a été utilisée pour le F117 et le B2. La société ARC Technologies (<http://www.arc-tech.com/>) commercialise des matériaux absorbants de ce type, des mousses chargées et des matériaux ou empilements accordés large bande. Il en est de même pour Cumming Microwave et quelques autres, la plupart aux États-Unis.

3.2.2.3 Mise en œuvre des matériaux absorbants

La mise en œuvre des matériaux absorbants est importante, de même que leur maintenance (voir l'exemple du B2). Il faut bien sûr éviter de créer de nouveaux contributeurs aux extrémités des parties revêtues, ou aux jonctions de deux zones de matériaux. De fait, les lignes droites, surtout perpendiculaires aux directions d'incidence potentielles des ondes, sont à proscrire. Le plus simple est bien sûr de revêtir l'ensemble de l'objet, mais le surpoids peut devenir rédhibitoire.

La méthodologie de revêtement commence par l'identification des principaux contributeurs de la SER de l'objet non revêtu. On choisit alors le matériau ou l'empilement de matériaux absorbants adapté à la menace (bande de fréquence, angle d'incidence, etc.) et on l'applique selon les contraintes opérationnelles (masse, place disponible, éventuelle contrainte d'aérodynamique).

La figure 24 montre un exemple de pose d'un revêtement absorbant sur une aile, le bord de fuite est revêtu des deux côtés (dessus-dessous). Le découpage en dents de scie, dont le principe a été expliqué plus haut, est repris ici pour diminuer l'effet de la discontinuité d'impédance à l'extrémité de la zone revêtue. Le revêtement des deux côtés atténue les ondes rampantes lancées par la diffraction sur le bord de fuite.

Les effets de la température sur les valeurs de perméabilité et de permittivité doivent aussi être pris en compte. En effet, un empilement accordé optimisé selon les épaisseurs et compositions des divers matériaux peut se révéler inadapté lors de son utilisation du fait de la modification de ε et μ à cause de la température. Or, des points chauds, dus aux frottements, existent en de nombreux points de la surface d'un avion. Il faut donc connaître ces variations et en tenir compte pour avoir un revêtement absorbant opérationnel.

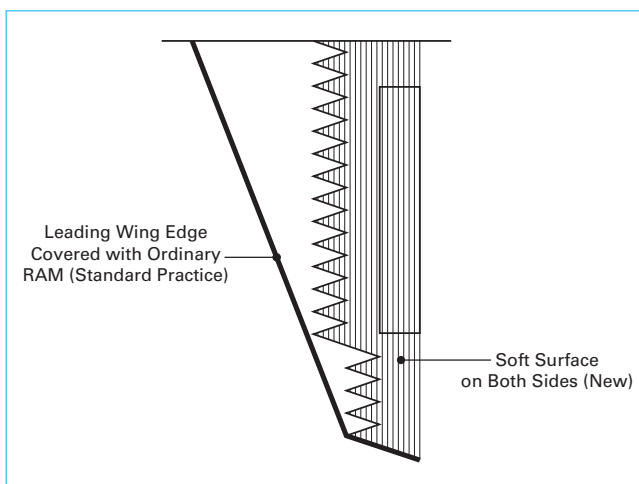


Figure 24 – Revêtement en dents de scie (tiré de la thèse de Serge Strobandt)

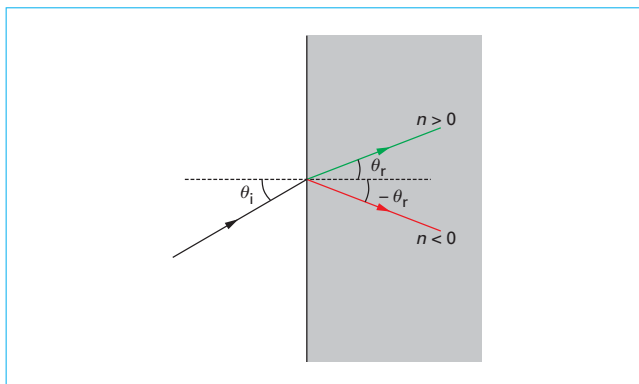


Figure 25 – Réfraction dans un matériau d'indice négatif

3.3 Matériaux périodiques et métamatériaux

En 1968, Veselago a étudié le comportement théorique de matériaux présentant une permittivité et une perméabilité négatives (parties réelles). Il a notamment montré que la réfraction d'une onde à l'interface d'un tel matériau ne suivait plus les lois habituelles de Snell-Descartes (figure 25). Ce n'est qu'au début des années 2000 que Pendry et Smith ont réalisé expérimentalement ces matériaux et mesuré leurs propriétés. Ils étaient formés de réseaux de résonateurs en anneaux de petites dimensions par rapport à la longueur d'onde (figure 26) noyés dans une matrice isotrope et présentaient une valeur négative de perméabilité (partie réelle) sur une faible bande fréquentielle.

Nota : la perméabilité est un nombre complexe $\mu = \mu' + j\mu''$, la partie imaginaire traduisant les pertes. Une partie imaginaire négative est impossible pour un matériau passif.

Ces matériaux composites acquièrent des propriétés magnétiques (perméabilité relative différente de 1) en l'absence de composant magnétique : c'est pourquoi on les nomme « métamatériaux ».

Depuis, de nombreux travaux ont été menés dans ce domaine, pour réaliser des métamatériaux présentant des propriétés exotiques, en modifiant les formes des inclusions ou à base d'antennes chargées par un circuit électronique.

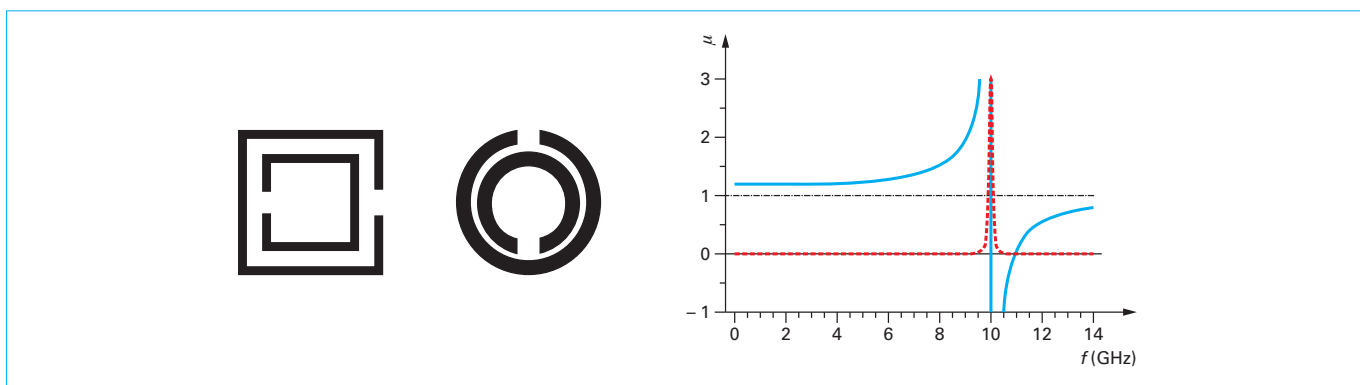


Figure 26 – Résonateurs en anneaux (carrés et circulaires) et allure de la perméabilité du composite (bleu : réelle, rouge : imaginaire)

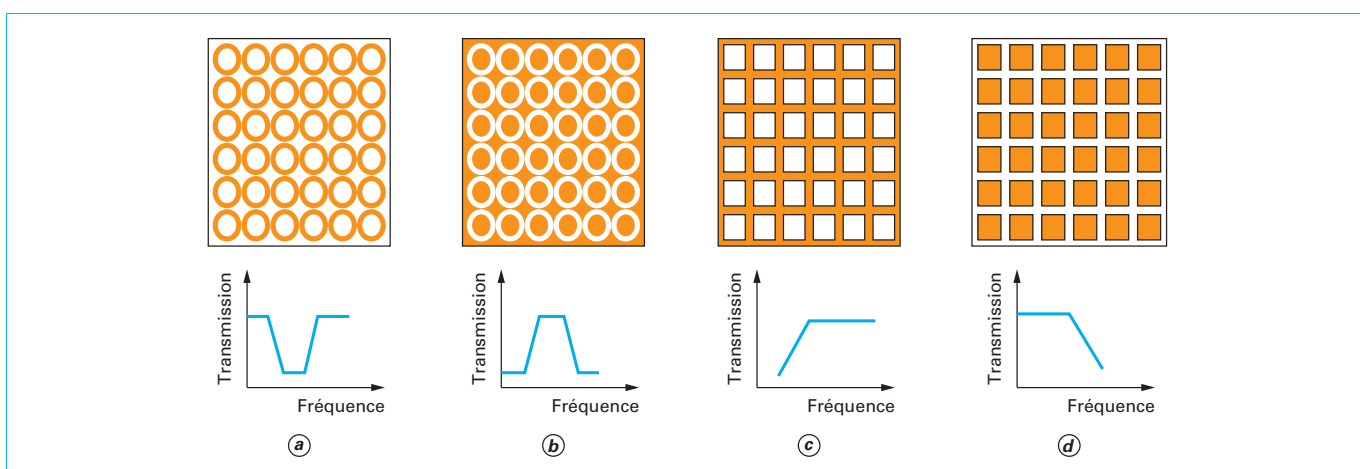


Figure 27 – Comportement des FSS (tiré de la thèse de E.B. Tchikaya – 2010)

Une autre classe de métamatériaux est celle des structures à bandes interdites (PBG : *Photonic band gaps*) ou surfaces sélectives en fréquence (FSS : *Frequency Selective Surface* voir figure 27), structures périodiques qui interdisent la propagation d'onde à certaines fréquences ou selon certaines valeurs d'angles d'incidence. Une application simple des FSS est de les intercaler entre deux couches absorbantes à différentes fréquences, la FSS permettant de moduler le comportement fréquentiel de l'empilement. On voit apparaître des études associant les FSS et éléments actifs (diodes PIN) pour en contrôler l'absorption sur une large bande fréquentielle.

Aucun indice ne montre que de tels matériaux sont mis en œuvre pour des besoins de furtivité, mais ils sont parfois utilisés pour diminuer la SER des antennes radar embarquées. Cependant, les recherches dans ce domaine vont bientôt gagner en maturité et il est fort probable que ces métamatériaux seront utilisés dans les prochaines générations d'avions furtifs.

3.4 Systèmes électroniques et contre-mesures

3.4.1 Annulation active

Le principal inconvénient des matériaux absorbants radar est leur masse, car déposés sur de grandes surfaces, ils peuvent devenir limitant vis-à-vis des contraintes de manœuvrabilité ou de

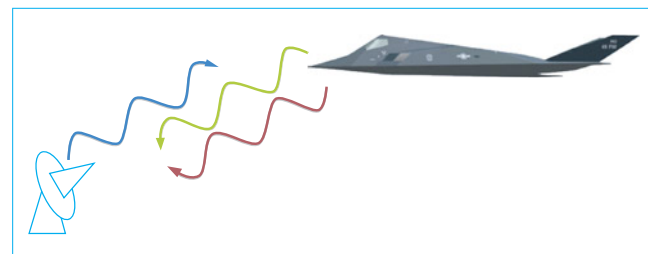


Figure 28 – Annulation active par opposition de phase

charge utile de l'aéronef. Les ingénieurs se sont alors tournés vers des contre-mesures électroniques embarquées pour diminuer la SER.

Le premier principe de l'annulation active (figure 28) consiste à renvoyer vers le radar une onde (rouge sur le schéma en ligne) exactement en opposition de phase et de même amplitude que celle renvoyée naturellement par l'objet (verte sur le schéma en ligne).

Si ce principe est théoriquement simple, la pratique est bien plus complexe car il faut pouvoir recueillir l'onde incidente, analyser ses caractéristiques (forme d'onde, fréquence, polarisation) et sa direction d'incidence pour calculer et générer l'onde à renvoyer

pour annuler. Compte tenu de la vitesse de propagation, cette annulation n'est pas instantanée puisqu'elle requiert un temps de traitement avant d'émettre l'onde annulatrice. De plus, l'annulation ne pourrait se faire qu'en boucle ouverte car il n'est pas possible de mesurer l'erreur (le résidu après addition de ces deux ondes au niveau du radar).

La grande difficulté de cette technique tient dans la précision de restitution de l'onde renvoyée pour annuler : sa phase doit être très précisément ajustée à celle de l'onde diffractée par l'avion (à 180° près) et cette phase contient des informations sur les positions relatives des divers contributeurs à la SER de l'objet. Elle est donc très rapidement fluctuante dès que l'on est en régime haute fréquence (zone optique) : pour la reproduire, il faut connaître très précisément la SER de l'avion et ses mécanismes de formation, en plus de connaître parfaitement l'onde incidente.

En basse fréquence (zone de Rayleigh ou zone de résonance), c'est un peu moins complexe en théorie puisque la phase varie moins vite, mais ça n'enlève rien aux autres problèmes. Il est très peu probable que cette méthode soit effectivement employée pour réduire la SER d'un avion aujourd'hui.

D'autres techniques existent visant à leurrer le radar émetteur, toujours en superposant une onde à celle qui est diffusée par la cible. On vise ici à modifier la forme d'onde incidente, sa fréquence ou d'autres paramètres pour faire croire au radar que l'objet n'est pas à sa vraie position ou se déplace à une vitesse différente, voire qu'il y en a plus qu'en réalité.

3.4.2 Brouilleur, paillettes

Le brouillage est une contre-mesure au radar qui consiste à émettre un signal (bruit) supplémentaire interférant avec les signaux reçus par le radar. Ce signal additionnel ne faisant qu'un seul trajet, il est moins atténué et peut donc saturer facilement le récepteur. Il faut cependant utiliser un système actif pour émettre ce signal de brouillage.

Une solution similaire passive consiste à répandre des paillettes métalliques (chafs) de différentes longueurs et formes qui vont renvoyer le signal radar et créer une multitude de faux échos, voire des leurres que le radar va suivre en oubliant sa cible initiale.

Ces artefacts sont des aides à la furtivité.

3.5 Quelques exemples

3.5.1 Avions

Dès 1944, les Allemands ont construit un prototype d'aile volante, le Horten HO 2-29 capable de transporter 1 000 kg de munitions sur 1 000 km à 1 000 km/h. Construit avec des structures en bois, un design très lisse (semblable au B2, voir figure 29), il aurait été le premier avion furtif s'il avait été produit en série. Après la guerre, les américains ont récupéré un exemplaire qui a été transmis à Northrop et pourrait avoir finalement conduit au B2.



Figure 29 – Reconstitution du HO 2-29



Figure 30 – Sukhoi Su47



Figure 31 – Rafale et ATD-X

Après le Lockheed F117 (voir paragraphe 4) et le Northrop B2, les années 1990 ont vu les programmes d'avions furtifs se multiplier. Lockheed a développé le F22 « Raptor » (voir paragraphe 5), un chasseur supersonique en activité depuis 2005 et travaille sur le F35 « Lightning », avion multirôle (comme le Rafale) supersonique dont la mise en service serait prévue en 2014.

Les Russes ont conçu le Mig 1.42, chasseur supersonique de grande maniabilité, abandonné au profit du Sukhoi Su47 « Berkut » qui est un chasseur furtif instable (le centre de gravité est placé derrière le foyer des forces aérodynamiques ce qui tend à cabrer naturellement l'avion, seules les commandes de vol électriques permettent de corriger cette tendance en permanence) à flèche inversée (figure 30).

D'autres exemples de programmes d'avions furtifs à des degrés divers existent dans le monde, le moindre n'étant pas le Rafale de Dassault Aviation (figure 31), avion multi-rôle construit au milieu des années 1980.

On connaît aussi le T-50 de Sukhoi, dont les tests ont débuté en 2010, le MCA Indien, le futur ATD-X Japonais et le programme J-20 récemment lancé par la Chine. On note la forte ressemblance de l'ATD-X avec le F22 Raptor...

Le tableau 2 indique la SER estimée de quelques avions. Ce sont des valeurs moyennes, car la SER varie en fonction de la fréquence et de la direction d'arrivée de l'onde, l'intérêt de ces valeurs réside plutôt dans leur comparaison.

3.5.2 Missiles et drones

La question de furtivité ne se pose pas pour les missiles balistiques, dont les gaz de combustion sont visibles de très loin. Par contre, les têtes nucléaires qu'ils peuvent emporter sont très furtives mais l'échauffement à la rentrée dans l'atmosphère les rend détectables dans l'infrarouge.

Les missiles air-air, souvent de petite taille, échappent aux radars mais leur échauffement, dû à leur grande vitesse et aux frottements de l'air, les rend visibles en infrarouge.

Tableau 2 – SER estimée de quelques objets volants		
Objet	SER (m ²)	SER (dB · m ²)
B-52	100	20
F-15 Eagle	30	15
B-1A, SR 71	10	10
MIG 21	4	6
F-16, F-18	1,2	0
Rafale, MIG 29, B-1B	0,75	– 2
SR-71 Blackbird	0,014	– 18
Oiseau	0,01	– 20
F-22 Raptor	0,006	– 22
F-117 Nighthawk	0,003	– 25
B-2 Spirit, Insecte	0,0014	– 30



Figure 32 – Missile de croisière AGM 129

Les missiles de croisière peuvent voler très près du sol pour échapper aux radars. Certains d’entre eux ont été traités pour améliorer leur furtivité. L’AGM-159 (figure 32) de General Dynamics, conçu dans les années 1980, en fut un bon exemple. La pointe avant effilée et les grandes surfaces planes semblent adaptées à une réduction de la SER.

Pour lui permettre d’atteindre une portée supérieure à 3 000 kilomètres, il a été nécessaire de diminuer la SER de ce missile, à la fois par la forme (nez pointu, entrée d’air collée au fuselage, flèche inversée comme le Sukhoi Su37) et l’utilisation de structures et matériaux absorbants. L’échappement est similaire à celui du F117 : une sortie d’air « en ligne » améliore le mélange des gaz et d’air frais et réduit la signature dans l’infrarouge.

D’autres missiles sont aussi conçus pour être furtifs, le site de la Marine nationale mentionne ainsi le SCALP (Système de Croisière Autonome à Longue Portée), missile de croisière furtif et autonome équipant les Rafales version Marine de forme similaire à l’AGM 129.

Les années 1990 ont vu le développement des drones, avions sans pilote de reconnaissance ou de combat, et de leurs versions furtives, comme le Lockheed Martin RQ-170 Sentinel américain, le Taranis anglais et le Sea Avenger (figure 33), de General Atomics présenté en 2010. Notons aussi le nEUROn de Dassault Aviation, qui ressemble à une version réduite du B2 : ce n’est qu’un démonstrateur technologique, il n’est pas prévu de le commercialiser. Son premier vol est prévu pour début 2012, sa SER serait celle « d’un moineau » (pour une envergure de 12,5 m), soit près de – 20 dB · m².



Figure 33 – Sea Avenger et nEUROn de Dassault Aviation



Figure 34 – Bateaux militaires classiques

Lockheed Martin a dévoilé en 2005 son projet de drone furtif appelé Cormoran (MPUAV : *Multi Purpose Unmanned Aerial Vehicle*) dont l’originalité tient au fait qu’il est lancé depuis un sous-marin pour effectuer ses missions (observation, bombardement) et revenir ensuite à son point de départ.

3.5.3 Bateaux et sous-marins

Les bateaux sont aussi concernés par la furtivité, les grands bâtiments militaires étant souvent formés de structures complexes et de parois verticales de grandes tailles, donc dotés d’une SER très large (figure 34).

Dans les années 1980, Lockheed a construit un catamaran furtif, nommé le Sea Shadow (figure 35), reprenant les principes de furtivité du F117 : grandes plaques planes inclinées pour renvoyer l’onde dans d’autres directions que celle du radar, arêtes vives et réduction des protubérances. Sa forme de catamaran lui assure une très bonne stabilité même par gros temps. Ce navire n’aurait jamais été mis en service officiellement.

Les frégates françaises de type Lafayette, en service depuis les années 1990, utilisent ces mêmes principes, ainsi que des structures absorbantes composites (figure 36).

Notons aussi le Stiletto (figure 36) et les corvettes Visby de la marine Suédoise (figure 37) dont le constructeur annonce une distance de détection de 22 km par mer calme et 13 km par mer agitée, pouvant descendre à 8 km en présence de brouillage.

Les bateaux et sous-marins sont aussi concernés par des enjeux de furtivité acoustique (Sonar). Des efforts sont faits pour réduire la cavitation (le bruit provoqué par l’éclatement des bulles d’air créées par les hélices), les bruits des moteurs, voire celui des rasoirs dans les sous-marins. Le Sea Shadow a ses moteurs positionnés sur des ponts intermédiaires bien au-dessus de la ligne de flottaison, ce qui les rend moins détectables au Sonar. Sa propulsion mixte diesel-électrique renforce cet aspect.

Tout récemment (janvier 2011), des études américaines (Université de l’Illinois à Urbana-Champaign) ont permis de concevoir un métamatériau acoustique, capable de cacher un objet qu’il revêt, en annulant la modification des ondes provoquées par la présence

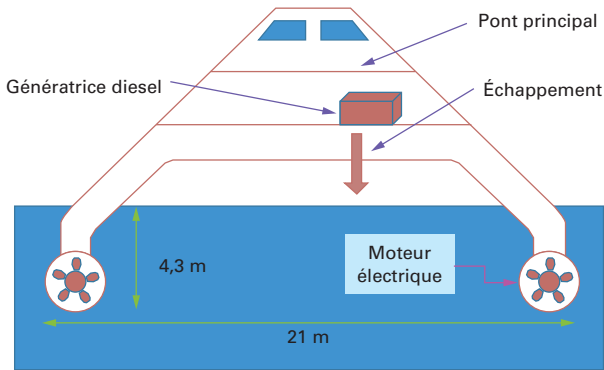


Figure 35 – Lockheed Sea Shadow



Figure 36 – Bateaux furtifs (frégate Lafayette, Stiletto de M Ship)



Figure 37 – Corvette Visby

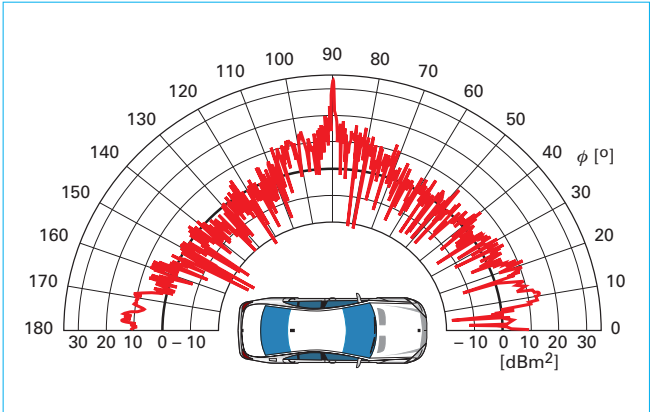


Figure 38 – SER d'une voiture calculée à 10 GHz

de cet objet. Pour l'instant, en configuration cylindrique, ce revêtement est formé d'un réseau de cavités de tailles optimisées reliées par des canaux. Les ondes sont guidées par ce réseau et évitent l'objet placé au centre (un cylindre) puis se reforment en sortie sans présenter de perturbation.

3.5.4 Voiture ?

La multiplication des radars sur les routes pourraient inciter à appliquer les recettes de furtivité à des véhicules routiers... Le coût d'une modification de la forme ainsi que la masse et la complexité du revêtement (il faudrait connaître la fréquence pour adapter le matériau absorbant) rendent ce rêve rédhibitoire (figure 38). Il est de plus fort probable qu'un tel véhicule serait rapidement arrêté par la police, d'abord par curiosité puis pour diverses infractions au Code de la route.

3.6 Compatibilité de la conception furtive et de l'aérodynamique

Comme pour la furtivité, la forme d'un avion a une grande influence sur son aérodynamique. La traînée d'un objet, qui représente la résistance à l'avancement, dépend de sa forme, et notamment de l'absence de variations brutales, qui sont sources de décrochements de l'écoulement d'air créant des turbulences. La portance, force qui permet à l'avion de voler, est induite par la dépression créée au-dessus du profil (aile et fuselage) par l'écoulement de l'air autour. L'optimisation du couple portance/trainée et des performances d'un avion se fait souvent au détriment de sa furtivité. Il est rare qu'un aéronef ou un missile furtif présente de bonnes qualités aérodynamiques.

Les surfaces anguleuses du F117 le rendent difficile à piloter et diminuent ses performances. Ce n'est qu'à l'aide des ordinateurs embarqués, qui corrigent en permanence les commandes de vol électriques (issues du F-16, elles sont redondées 4 fois), que le pilote peut le contrôler.

Il semble que les baisses de performances aérodynamiques dues à la facettisation soient contrebalancées par un surdimensionnement des réacteurs. Cependant, l'absence de poussée vectorielle sur le F117 (orientation du jet du réacteur pour augmenter la manœuvrabilité) lui impose de rester le plus longtemps possible indétecté, car il a peu de possibilité de s'évader d'un engagement aérien (il n'importe d'ailleurs pas de canon).

4. Zoom sur le Lockheed F117

Le tableau 3 résume les spécifications du F117.

Issu du programme de recherche « Skunk works » des années 1970, le prototype Have Blue a donné naissance au F117 qui a volé pour la première fois en juin 1981. La structure d'aluminium et titane est entièrement revêtue de matériau absorbant, fait d'un polymère chargé par des particules ferreuses. Ce matériau, initialement appliqué par plaques collées, a par la suite été projeté sur l'avion, celui-ci étant tourné tel un poulet dans une rôtissoire.

Les structures de l'avion utilisent aussi largement les composites NIDA qui, s'ils ne sont pas chargés en fer, laissent passer l'onde radar sans presque l'altérer (à condition qu'il n'y ait pas d'obstacle à l'intérieur, câble ou tuyau, par exemple). Les bords d'attaques des ailes, les dérives et bords de fuite sont faits en composites structurants chargés par des absorbants radar.

Les réacteurs sont au fond des conduits d'air courbés, dont les entrées sont fermées par des grillages (figure 39) eux-mêmes revêtus d'une peinture absorbante. Si la longueur d'onde de l'onde radar incidente est supérieure au pas du grillage, celui-ci est vu comme une plaque métallique et l'entrée d'air ne participe pas plus à la SER que le reste de l'avion. Par contre, cela a un fort impact sur les performances des réacteurs et limite le F117 au haut subsonique.

Les sorties des réacteurs sont allongées afin de faciliter le mélange de l'air chaud expulsé avec l'air froid ambiant pour réduire la signature dans l'infrarouge. Ainsi, l'avion est moins vulnérable aux missiles ennemis guidés par autodirecteur IR. Les parois visibles sur la figure 39 dans les sorties d'air sont prévues pour en diminuer la SER (effet similaire aux dents de scie).

Toujours pour des raisons de furtivité, le F117 n'est pas équipé d'un radar, mais de systèmes de détection infrarouge passifs (FLIR : *Forward Looking Infra Red*, DLIR : *Downward Looking Infra Red*) et d'un laser pour illuminer ses cibles (visibles sur la figure 40) sous le cockpit à l'avant. En vol, cette cavité est aussi fermée par un grillage.

Tableau 3 – Spécifications du Lockheed F117	
Fonction	Avion d'attaque furtif
Constructeur	Lockheed Martin
Production	89
Mise en service	1982
Longueur	19,4 m
Envergure	13,2 m
Surface alaire	73 m ²
Hauteur	3,9 m
Masse à vide	13,6 t
Masse au décollage	23,6 t
Charge utile	1 800 kg
Moteurs	2 réacteurs General Electric F104
Poussée	2 × 4 900 kg
Vitesse	1 120 km/h (Mach 0,92)
Rayon d'action	800 km



Figure 39 – Entrées et sorties d'air des réacteurs du F117

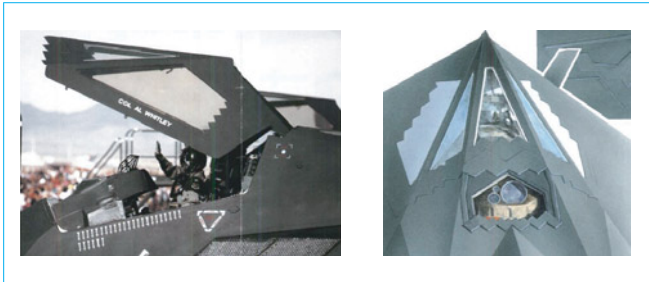


Figure 40 – Cockpit du F117

Toutes les trappes et ouvertures ont des arêtes en dents de scie, pour en diminuer la SER. Les fenêtres sont recouvertes d'une feuille d'or très fine (d'où leur couleur jaunâtre sur la figure 40) qui reste transparente dans le visible mais réfléchit comme un métal les ondes radar.

Le F117 a été utilisé plusieurs fois en temps de guerre, d'abord en 1989 lors de l'invasion du Panama par les États-Unis, puis en 1991 lors de la guerre du golfe. Les F117 représentaient 2,5 % de l'ensemble des avions américains déployés, et 32 % des bombardiers (*The Independent*, 15 novembre 1997).

Trente-six F117 étaient présents au début de l'opération Tempête du Désert, soit moins de 2,5 % du total des forces aériennes alliées ; ils ont cependant attaqué 31 % des cibles lors des premières 24 heures d'attaques aériennes. Le taux de réussite des bombes larguées a atteint 60 %. Les F117 ont contribué à neutraliser une grande partie des défenses aériennes irakiennes lors des premières heures du conflit.

5. Zoom sur le F22 Raptor

Le tableau 4 résume les spécifications du F22.

Le F22 Raptor (figure 41) a été conçu pour apporter la supériorité aérienne, c'est-à-dire le contrôle de l'espace aérien dans lequel il est engagé, en profitant de l'avantage apporté par la furtivité : la capacité à voir sans être vu pour tirer et abattre un adversaire en premier. Le F117, simple bombardier, ne pouvait répondre à ce cahier des charges, et le F15 devenait obsolète.

Pour atteindre cet objectif, il a fallu repartir d'une forme d'avion plus conventionnelle : le F117 a fait voler un avion furtif, le F22 a rendu furtif un chasseur performant.

Pour cela, les recettes classiques ont été utilisées, en oubliant la facettisation, incompatible des performances aérodynamiques recherchées. Tous les bords droits (bords d'attaque des ailes, des dérives, des entrées d'air) sont alignés afin de renvoyer l'onde dans une seule et même direction. La SER devient alors très faible sauf pour un petit nombre d'angles d'incidence. Toutes les surfaces sont lisses afin de ne pas créer d'obstacle aux courants de surface créés par l'onde radar.

L'ensemble de la charge utile est stockée à l'intérieur de l'avion, il n'y a pas de missile ou de réservoir externe, ce qui implique que les missiles embarqués sont de plus petites dimensions que pour d'autres avions : la furtivité du F22 a entraîné des contraintes sur son armement.

Les structures NIDA sont recouvertes d'une peinture métallisée pour empêcher l'onde de les pénétrer et de se diffracter sur les objets internes. Les arêtes des ouvertures sont cassées en dents de scie, la verrière est revêtue d'une fine couche de métal transparente, comme pour le F117 (figure 42).

Les conduits d'air des réacteurs sont courbes et optimisés pour conserver un flux d'air stationnaire, les sorties d'air orientables (de +/- 20° pour la poussée vectorielle) sont traitées pour diminuer leur SER.

Le F22 embarque un radar, dont il a fallu optimiser la SER : le radome ne laisse passer que les fréquences du radar et son antenne active a été positionnée pour réduire au maximum les réflexions. Les autres antennes du F22 ont été dessinées avec les plus petites surfaces possibles afin d'en réduire la SER sans trop diminuer leurs performances.

Les matériaux absorbants ont été positionnés aux endroits critiques, en minimisant leurs surfaces pour en diminuer le poids. Les structures composites absorbantes forment les bords droits et les matériaux absorbants sont déposés aux ruptures de géométrie. Les surfaces revêtues ont été optimisées à l'aide de codes de calcul de SER (une première).

La SER du F22 a été calculée, optimisée puis mesurée dans des chambres spécifiquement construites, dont une chambre anéchoïde de 50 x 70 m. L'avion était suspendu au plafond et tournait dans un plan horizontal pendant les mesures.

Le F22 embarque une puissance de calcul équivalente à celle de deux superordinateurs Cray. Les commandes de vol électriques sont redondées trois fois, les communications se font par fibres optiques.

Tableau 4 – Spécifications du F22 Raptor	
Fonction	Chasseur monoplace
Constructeur	Lockheed Martin
Production	183 sont prévus
Mise en service	12/2005
Longueur	19 m
Envergure	13,5 m
Surface alaire	78 m ²
Hauteur	5 m
Masse à vide	15 t
Masse au décollage	28,1 t
Charge utile	10 t
Moteurs	2 réacteurs Pratt & Whitney
Altitude maximale	20 km
Vitesse	2 330 km/h (Mach 2.2)
Rayon d'action	2 400 km

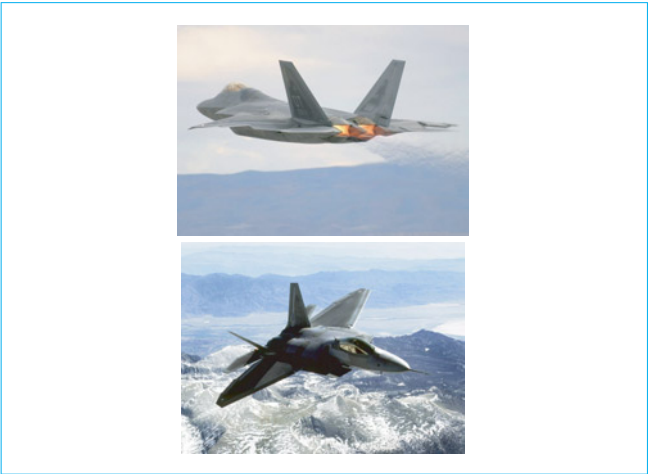


Figure 41 – F22 Raptor



Figure 42 – F117 et F22

6. Mesure de SER

6.1 Problématique

Après la phase de conception et de réalisation, vient la validation. Se pose alors le problème de mesurer le champ électromagnétique diffracté par un objet pour en déduire sa SER. Celle-ci se calculant à partir des champs à l'infini, il est nécessaire d'effectuer la mesure à un endroit où les fronts d'onde sont suffisamment plats.

Pour cela, il existe deux possibilités :

- mesure à grande distance ;
- mesure en chambre close.

Dans tous les cas, la mesure se fait à partir d'un radar qui émet et reçoit un signal, d'une instrumentation capable de mémoriser et traiter les grandeurs mesurées, d'un système de positionnement de la cible capable de la faire tourner selon un ou plusieurs axes et d'un environnement faiblement bruité dans la gamme de fréquence de la mesure. Ce dernier point est très important si l'on veut mesurer une SER très faible : cela entraîne très souvent l'utilisation de chambres fermées anéchoïdes.

6.2 Chambre anéchoïde

Pour des mesures de faibles SER, ou pour des raisons de confidentialité, il peut être nécessaire d'utiliser des chambres anéchoïdes. Le premier problème qui se pose est de recréer une zone de fronts d'ondes plats à faible distance : cela s'obtient par des systèmes de lentilles ou de réflecteurs qui vont transformer une onde sphérique ou cylindrique en une onde plane. Le deuxième problème est qu'il faut éliminer les réflexions sur les parois de la chambre, afin de réduire le niveau de bruit au maximum : cela est obtenu en les revêtant de matériaux absorbants pyramidaux ou diédraux (figure 43), le plus souvent diélectriques (mousses chargées de carbone, voir figure 44). Ces absorbants, qui fonctionnent sur un principe similaire aux dents de scie (figure 21), doivent avoir une épaisseur de l'ordre de grandeur de la plus grande longueur d'onde de mesure. Pour en améliorer le fonctionnement à basse fréquence, on les dépose parfois sur des plaques de ferrites. Enfin, le dernier problème est celui des dimensions de la chambre elle-même : il est nécessaire d'avoir de l'espace pour mesurer les SER d'un gros objet (avion, tank) ou pour pouvoir descendre assez bas en fréquence (UHF voire VHF).

La photo de la figure 44 à droite représente la base CAMELIA, située au CEA CESTA près de Bordeaux. Elle mesure 45 m de long sur 12 m de large et 13 m de haut. Le champ électromagnétique est renvoyé sur la cible par un réflecteur parabolique, dont les arêtes ont été découpées en dents de scie afin d'en limiter la diffraction à basse fréquence. L'objet à caractériser est soit posé sur un mât, soit suspendu par des fils très fins en kevlar. Les mesures se font en monostatique entre 100 MHz et 20 GHz.

Pour remonter à la valeur de la SER à partir des mesures, il peut être nécessaire de procéder à un étalonnage, surtout pour de faibles valeurs de SER pour lesquelles une très petite variation des conditions de mesure (changement de température dans la chambre, par exemple) peut être source d'erreurs. On procède donc à la mesure avec l'objet, à la mesure de la chambre vide juste avant ou juste après, à la mesure d'un étalon (sphère métallique) et à la mesure de la chambre vide juste avant ou juste après.

La SER de l'objet s'obtient par la formule :

$$\text{SER objet} = \frac{\text{Mesure objet} - \text{Chambre vide objet}}{\text{Mesure étalon} - \text{Chambre vide étalon}} \cdot \text{SER théorique étalon}$$



Figure 43 – Absorbants pyramidaux (crédit CEA)

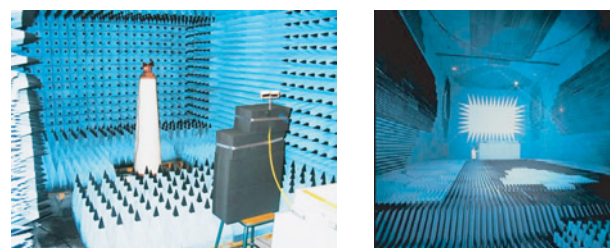


Figure 44 – Chambre de mesure de SER à l'IETR à Rennes et au CEA à Bordeaux



Figure 45 – Base de mesure « Tejon Ranch » de Northrop au nord de Los Angeles (Californie)

6.3 Autres bases de mesure

Pour mesurer la SER de grands objets dans des conditions de champ lointain, il faut avoir recours à des bases extérieures. En effet, la frontière entre champ proche et champ lointain est fixée à $2D^2/\lambda$ où D est la dimension maximale de l'objet et λ la longueur d'onde : la distance peut être supérieure à une centaine de mètres pour des objets de quelques mètres caractérisés à 10 GHz.

Un désavantage d'une mesure en extérieur est que celle-ci est dépendante des conditions météo, on conçoit alors qu'il soit difficile de mesurer la SER d'objets très furtifs, compte tenu de la procédure de mesure décrite plus haut. De plus, le mât de support de la cible doit avoir aussi une SER assez basse et il faut pouvoir s'affranchir des réflexions parasites sur le sol.

Northrop dispose de moyens de mesure au Ranch Tejon, en Californie (figure 45) : deux bases de mesures de SER extérieures et une chambre anéchoïde compacte, capables de caractériser des cibles entre 145 MHz et 18 GHz, en polarisations horizontale et verticale. Les cibles jusqu'à 4 500 kg sont posées sur un mât de 4, 8 ou 15 m de long, situé entre 450 et 900 m du radar. Un mât en mousse peut être utilisé pour des cibles plus furtives allant jusqu'à 900 kg.



Figure 46 – Mesure de la SER du F22 chez Lockheed Martin

La base compacte fait $12\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ avec une zone de champ calme de forme cylindrique d'un diamètre de 2 m sur 2 m de long. Elle fait des mesures entre 2 et 18 GHz (probablement la gamme de furtivité du F22).

De même, Lockheed dispose d'une chambre de mesure située dans son usine de Marietta en Géorgie (figure 46). Les dimensions sont de $64\text{ m} \times 45\text{ m} \times 14\text{ m}$. L'avion est posé sur des pylônes afin que le train d'atterrissage ne gêne pas les mesures. On distingue le plateau tournant sur la photo.

En France, l'ex-CELAR (Centre d'électronique des Armées) devenu depuis 2009 « DGA-Maîtrise de l'information », situé à Bruz au sud de Rennes, dispose de la base de mesure SOLANGE permettant de mesurer la SER d'avions suspendus sous un portique de 35 m de haut. Selon Ouest-France (mars 2011), une maquette de l'avion furtif Japonais ATD-X y aurait été testée entre septembre et novembre 2005.

7. Conclusion

7.1 Évolution des menaces

On a vu ci-dessus que l'histoire de la furtivité est assez récente mais a connu une accélération dans les années 1980 donnant lieu à plusieurs générations d'aéronefs furtifs. Ces avions, et notamment le Lockheed F22 et certainement le Sukhoi Su47, atteignent des niveaux de performances très élevés aussi bien en termes de vol que de furtivité. Ils semblent invincibles et apportent un avantage décisif en cas de combat.

Aujourd'hui, la manœuvrabilité du F22 et ses performances en vol lui donnent une nette supériorité en combat aérien. Sa furtivité lui permet de s'approcher de son ennemi suffisamment près pour lancer son attaque sans être détecté et donc de frapper le premier, ce qui est capital dans un contexte d'armement moderne de haute précision. En effet, comme on l'a vu, son seul inconvénient est de ne pouvoir emporter de missiles de longue portée car ses soutes sont trop petites.

Par contre, pour une mission de reconnaissance ou de frappe sur des cibles terrestres, de nouvelles menaces apparaissent contre lesquelles sa conception furtive est encore peu efficace.

7.1.1 Radar bistatique

Un des grands principes présenté dans ce mémoire consiste à détourner l'énergie incidente du radar vers une autre direction, afin que le signal mesuré par ce radar soit uniquement dû aux

diffractions ou rayons rampants. Cela est obtenu par l'utilisation de grandes surfaces planes et d'arêtes parallèles.

L'inconvénient majeur est que si un autre radar se trouve dans la direction où cette énergie est massivement renvoyée (réflexion spéculaire), la cible sera très visible. Il en est de même pour un radar situé à 180° du radar incident par rapport à l'avion (forward scattering), puisque la SER est proportionnelle au carré de la section de la cible, quel que soit l'effort fait pour la diminuer.

Si le principe semble simple, il n'est pas forcément facile à mettre en œuvre : en effet, le radar récepteur doit bien connaître les paramètres du radar émetteur et lui être précisément synchronisé pour apporter des informations de localisation fiables. De plus, l'énergie défléchie par l'avion arrive sur le radar récepteur comme un flash, il doit donc être à l'écoute dans la bonne direction au bon moment.

7.1.2 Radar passif

Initialement développé pendant la Guerre Froide, puis remis au goût du jour au début des années 2000, le radar passif est aussi un bon candidat pour la détection des objets furtifs. Le principe est d'utiliser de manière opportuniste les émissions électromagnétiques environnantes pour localiser une cible sans émettre d'onde radar. Les ondes EM utilisées sont principalement les émissions de radio ou de télévision, voire les signaux des stations de base des systèmes de téléphonie cellulaire et même ceux des satellites d'observation ou de télécommunication. Grâce au caractère pseudo-aléatoire de ces signaux, il est possible de les utiliser pour localiser (PCL : *Passive Coherent Location*) et suivre une cible. Des mesures sur divers signaux émis par la BBC (voix, musique et TV) ont permis de caractériser les performances obtenues par un radar passif qui les utiliserait : en termes de résolution spatiale, les émissions numériques audio (DAB : *Digital Audio Broadcast*) et TV sont les meilleures, de par leur bande passante plus élevée. Il est amusant de voir qu'en FM, le reggae surpasse la musique classique et que la voix est peu efficace du fait des pauses entre mots et phrases.

Les radars passifs ont d'énormes avantages par rapport aux radars conventionnels, le premier étant leur prix : un « CellIDAR » (néologisme formé par « cellular » et « radar ») formé d'un PC et de deux téléphones portables coûte quelques milliers d'euros. Ils peuvent être facilement embarqués sur des drones, donc peuvent être utilisés dans des régions non couvertes par les radars. Ils sont efficaces contre les cibles à basse altitude et ne sont pas soumis aux réglementations d'allocation des bandes de fréquence. Passifs, ils sont indétectables. Enfin, s'appuyant sur le principe du radar bistatique, ils ont de bonnes capacités à détecter les objets furtifs, amplifiées par la multiplicité des émetteurs qu'ils peuvent utiliser.

Ils sont par contre plus sensibles au brouillage, puisque les spectres des émissions sont connus.

L'un des radars passifs les plus connus est le « Silent Sentry » (sentinelle silencieuse, figure 47) développé par Lockheed Martin ; il annonce une capacité à suivre plus d'une centaine de cibles simultanément, et de les positionner avec une précision de quelques centaines de mètres (mesure de vitesse horizontale à 2 m/s près), encore améliorée en cas d'utilisation d'émissions HDTV.

Sur le même principe, Thalès a conçu et installé sur la base aérienne de Villacoublay le radar passif Homeland Alerter 100 (HA 100) destiné à la surveillance aérienne basse et moyenne altitude. D'une portée de 100 kilomètres, ce radar a été présenté pour la première fois au Salon International du Bourget en juin 2007 et a été déployé afin de surveiller et sécuriser l'espace utilisé par le défilé aérien à l'occasion des cérémonies du 14 juillet 2010 à Paris.

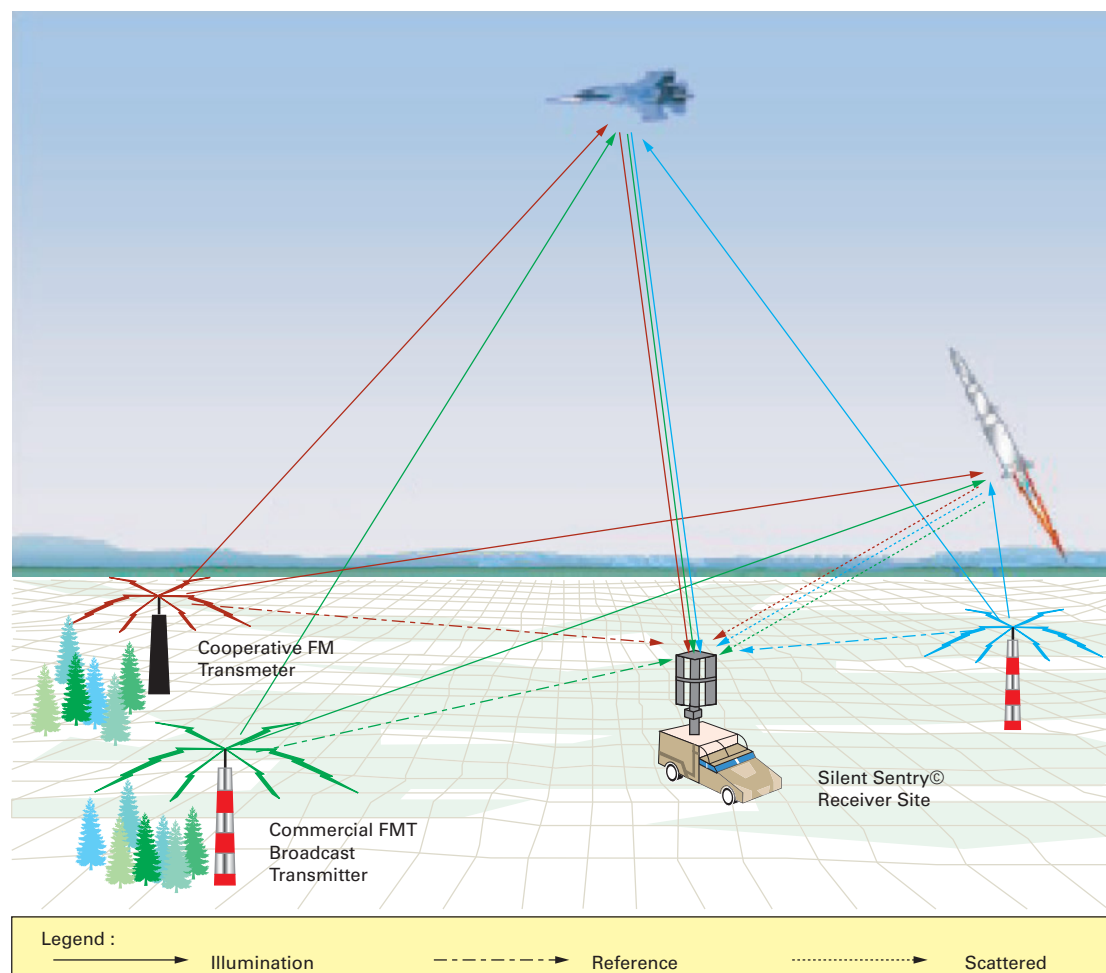


Figure 47 – Principe du Silent Sentry (© Lockheed Martin)

7.2 SIR

La SIR, ou signature infrarouge, caractérise les émissions de chaleur d'un objet. La puissance émise par une cible est proportionnelle à la puissance quatrième de la température. Elle est reliée à la production interne de chaleur et la diffusion du rayonnement solaire et dépend de plus du contraste par rapport au fond.

Ce paramètre est important car la plupart des missiles air-air sont dirigés par un capteur infrarouge (figure 48). C'est donc un challenge important en termes de furtivité.

L'effort SIR porté sur le F22 est important, notamment pour ce qui concerne les réacteurs. La chaleur des moteurs est évacuée dans le carburant puis par des tuyères effilées et équipées de systèmes de refroidissement. Les autres points chauds (bords d'attaque des ailes, par exemple) sont traités avec un revêtement à faible émissivité. D'autres concepts visant à imiter l'action de la sueur pour refroidir les surfaces existent.

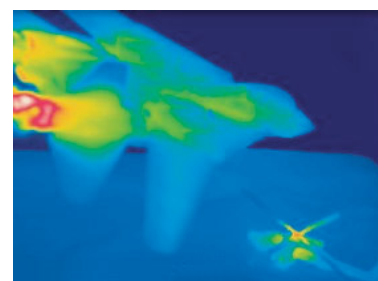


Figure 48 – Image IR d'un F14 Tomcat au-dessus d'un hélicoptère

7.3 Le Futur

À toute mesure correspond une contre-mesure, c'est la loi de l'évolution militaire. La furtivité a été la réponse à l'invention du radar, et de nombreuses avancées scientifiques et techniques ont été faites depuis les années 1980 dans ce domaine. Les performances du F22 Raptor sont étonnantes, et il est fort probable que son successeur soit déjà dans les cartons (comme le Lockheed F35, par exemple), avec des performances encore améliorées. On a vu que les métamatériaux offrent des perspectives très intéressantes et que l'annulation active et la furtivité plasma sont encore à des niveaux théoriques peu compatibles avec une mise en œuvre proche.

Il reste donc encore de belles réalisations à faire pour implémenter ces concepts ou tenir compte de l'évolution de la menace radar. Cependant, l'un des ennemis de la furtivité est son coût. Le coût unitaire d'un F22 est estimé à 143 M\$, à comparer à 45 M\$ pour un F117. Le coût du B2 est estimé à 2,2 Md\$ (15 fois celui du F22), ce qui

explique qu'il a été construit seulement à 21 exemplaires. Si un radar passif à faible coût est suffisant pour détecter et alerter de l'arrivée des avions furtifs, leur intérêt est fortement amoindri.

L'avenir appartient peut-être aux drones furtifs, moins coûteux, voire aux micro-drones naturellement plus furtifs de par leur petite taille, capables de contrôler un champ de bataille complexe grâce à leur multiplicité et leur capacité de communication. On peut imaginer un grand nombre de ces objets, largués par des bombardiers loin du champ de bataille, chacun ayant une mission particulière (observation, communication, bombardement, attaque au sol, etc.) et gérés à distance depuis un PC sécurisé. Aucune intervention humaine sur place n'est nécessaire et l'abondance de drones autorise qu'un certain nombre d'entre eux soient abattus sans mettre en danger leurs missions.

Cela n'est qu'un exemple de futur possible, ces questions relèvent de la stratégie du champ de bataille, et il est probable que la furtivité ne soit aujourd'hui qu'un paramètre parmi beaucoup d'autres dans ce problème complexe.

Furtivité électromagnétique

par **Fabrice AUZANNEAU**

Chef du laboratoire de fiabilisation des systèmes embarqués au CEA LIST

Sources bibliographiques

AUZANNEAU (F.) et ZIOLKOWSKI (R.W.). – *Étude théorique de matériaux bianisotropes synthétiques contrôlables*. Journal de Physique III, p. 2405-2418 (1997).

BÉRENGER (J.-P.). – *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves*. Computational Physics, vol. 114, p. 185-200 (1994).

BOUCHE (D.), MOLINET (F.) et MITTRA (R.). – *Asymptotic methods in electromagnetic*. Springer (1997).

DAVID (A.). – *Analyse des signatures de cibles à l'aide du Radar HF-VHF multi fréquence et multi polarisation MOSAR*. Thèse, Université de Rennes (1999).

HARRINGTON (R.F.). – *Time-harmonic electromagnetic fields*. McGraw-Hill (1961).

HARRINGTON (R.F.). – *Field computation by moment methods*. Oxford University Press (1968).

JAMES (G.L.). – *Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves*. P. Peregrinus, Ltd. editor (1976).

KELLER (J.B.). – *Geometrical theory of diffraction*. J. Opt. Soc. Am., vol. 52, n° 2, p. 116-130 (1962).

KNOTT (E.F.), SHAEFFER (J.F.) et TULEY (M.T.). – *Radar cross section*. Artech House Boston (1993).

KOUYOUJIAN (R.G.) et PATHAK (P.H.). – *An uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface*. Proceedings of the IEEE, 62(11), p. 1448-1461 (1974).

MITTRA (R.). – *Computer techniques for electromagnetic*. Hemisphere Pub. Corp. (1973).

MOSALLAEI (H.) et RAHMAT-SAMII (Y.). – *RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM*. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 48, n° 10 (2000).

NUSSENZVEIG (H.M.). – *Diffraction effects in semi-classical scattering*. Cambridge University Press (1992).

POUIT (C.). – *Colloque international sur le radar*, Versailles (1978).

RUCK (G.T.) et BARRUCK (D.E.). – *Radar cross section handbook*. Plenum Press (1970).

SKOLNIK (M.I.). – *Radar handbook*. McGraw-Hill (1990).

SOMMERFELD (A.) et NAGEM (R.J.). – *Mathematical theory of diffraction*. Birkhauser (2004).

STRATTON (J.A.). – *Electromagnetic theory*. John Wiley and Sons (2007).

STROOBANDT (S.). – *The characterization of surface waves on low-observable structures*. Ms degree thesis, Université de Hull (1997).

SWARNER (W.) et PETERS (L.) Jr. – *Radar cross sections of dielectric or plasma coated conducting spheres and circular cylinders*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 11, Issue 5 (1963).

SWEETMAN (B.). – *F-22 Raptor*. Motorbooks International (1998).

TAFLOVE (A.). – *The finite-difference time-domain method*. Artech House (1995).

UFIMTSEV (P.Y.). – *Fundamentals of the physical theory of diffraction*. John Wiley and Sons (2007).

VESELAGO (V.G.). – *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of μ and ϵ* . Uspekhi Fizicheskikh Nauk (Russie) (1964).

VOLAKIS (J.M.). – *Finite element methods for electromagnetic*. John Wiley and Sons (1998).

YEE (K.S.). – *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, n° 14 (1996).

Sites Internet

http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/en/computational_electromagnetics

<http://www.bodrum-bodrum.com/vortex/arsenal/stealth.htm>

Formules UTD – GTD sous Matlab

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/2236-gtd-utd-diffraction>

Site de Lockheed Martin

http://www.lockheedmartin.com/capabilities/air_power/stealth/index.html

Cormoran MPUAV

http://www.youtube.com/watch?v=YQtPAaY5d1c&feature=player_embedded

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

EADS
Dassault
Lockheed Martin
Northrop
General Atomics
Sukhoi

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

CEA
ONERA
XLIM – Université de Limoges
Sandia National Laboratoires (USA, Albuquerque, Nouveau Mexique)

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com