



Station radar expérimentale HYCAM qui permet notamment l'analyse haute résolution de la signature radar en vol des avions. Source ONERA/J.P. Bébert.

# Origines et développements de la furtivité radar

## Jean-Louis Guiraud

Professeur des universités émérite,  
ISAE-SUPAERO

## Florent Christophe

Conseiller émérite, ONERA

**Si la presse grand public parle d'avions invisibles, on invoque également Harry Potter dans des revues scientifiques de renom en faisant référence à sa cape d'invisibilité...**

**Il est proposé ici le survol du domaine pluridisciplinaire de la réduction des signatures radar, bien évidemment soumis aux contraintes de la confidentialité industrielle et de Défense.**

## Les origines

L'invention du radar au début du XX<sup>ème</sup> siècle [1] et ses applications pendant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale allaient susciter, comme à chaque introduction d'une nouvelle technologie dans le domaine militaire, le développement de technologies susceptibles de le mettre en défaut.

Durant la dernière moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, au cours des conflits en Extrême Orient et au Moyen Orient, les avions de combat subirent des pertes importantes, dues essentiellement aux développements rapides des radars de détection, des radars de conduite de tir et des missiles Sol-Air ou SAM (*Surface to Air Missiles*).

Aux frontières de l'Europe occidentale, pendant cette période de « guerre froide », une barrière de radars fut installée en protection de l'URSS et des autres pays du Pacte de Varsovie, afin de prévenir tout franchissement d'avions non autorisés.

Plusieurs événements allaient mettre en première ligne de l'actualité la vulnérabilité

d'avions américains. Tout d'abord, l'incident du 1er avril 1960, où un avion espion de type U2 survolant, à très haute altitude le territoire de l'URSS, a été abattu ; puis les débuts de la guerre du Vietnam où les bombardiers des Etats-Unis essuyèrent de grosses pertes, 1641 avions abattus de 1962 à 1973. La guerre du Yom Kippour en 1973 entre Israël et ses voisins arabes confirma le besoin pour les avions de combats d'échapper à la détection radar. Les Israéliens perdirent ainsi 109 avions en 18 jours, abattus par les SAM-5, des missiles guidés par radar, armes fournies par l'URSS. L'introduction de ces nouveaux missiles dans la défense aérienne fut un véritable choc pour les armées de l'air occidentales. La prise de conscience des constructeurs d'avions de combat fut générale, et l'histoire de la « furtivité », terme encore peu utilisé à l'époque, commença véritablement dans ces années 70.

Dans le contexte international de guerre froide, la décision a été prise aux Etats-Unis de lancer la conception d'un avion présentant une faible « signature » aux radars.

Les avionneurs travaillant pour la Défense proposèrent des solutions. C'est la société Lockheed qui fut chargée de concevoir et de réaliser cet avion à très faible observabilité, Ben Rich était alors le président des Skunk Works [3]. Le secret de ces travaux, classés dans les « Programmes noirs », fut bien gardé pendant de nombreuses années, et ce n'est qu'en 1988 qu'une photographie du F117 (considéré comme le premier avion furtif) a été présentée à la presse [2].

De nouvelles techniques spécifiques, capables de ramener à un très faible niveau la visibilité des cibles, se sont alors développées, et elles font toujours l'objet d'études et de développements chez tous les industriels du domaine de l'aéronautique militaire, mais le détail des procédés utilisés comme leurs performances sont rarement publiés...

### L'essor de la furtivité

Dans le domaine de la Défense, les avions mais également les missiles, les

navires, voire les véhicules blindés terrestres, sont les cibles potentielles des radars de l'adversaire. Les techniques de furtivité mises au point pour réduire leur portée de détection, proportionnelle toutes choses égales par ailleurs à la racine quatrième de la surface équivalente radar ou SER, (voir [4, 5, 6, 7] et l'encadré 1), donneront à ces vecteurs une plus grande probabilité de réussite de leur mission, et une meilleure chance de survie à leur équipage. Réduire la SER d'un véhicule, c'est aussi réduire proportionnellement la puissance de brouillage ou la densité de leurres nécessaires dans les scénarios mettant également en œuvre des moyens de guerre électronique.

Les notions de furtivité peuvent être étendues à d'autres familles de systèmes de détection (acoustique, infrarouge, ...) mais la moyenne et longue portée étant l'apanage exclusif des radars, la priorité va au traitement de la signature des véhicules ou vecteurs aux longueurs d'onde électromagnétiques des menaces radar, à savoir :



Figure 1 : Le F 117, premier bombardier furtif - Source : Wikipedia.

- - quelques millimètres (pour des auto-directeurs de missiles bénéficiant d'une bonne précision angulaire avec une antenne de faible diamètre),
- quelques décimètres pour la surveillance lointaine,
- voire au-delà du mètre, si on prend en compte les radars transhorizon fonctionnant dans la bande HF pour bénéficier de la réflexion ionosphérique ou d'un guidage par onde de surface au-dessus de la mer, ou les radars « passifs » exploitant les émissions de radiodiffusion.

## La réduction de surface équivalente radar

Les méthodes pour réduire la SER d'un véhicule peuvent jouer tout d'abord sur le choix et l'orientation des formes, et leur recouvrement par des matériaux absorbants [8].

Dans le cas du F117, les surfaces et les arêtes sont orientées de manière que la réflexion spéculaire des ondes incidentes (le plus énergétique des mécanismes de diffraction) ne soit pas dans la direction des menaces radar, situées a priori dans le secteur avant.

Les matériaux absorbants recouvrant les parties métalliques peuvent être disposés en couches diélectriques superposées, avec des indices de réfraction progressifs et des pertes conductrices apportées par une densité optimisée de particules de carbone conductrices mais leur fonctionnement est limité vers les basses fréquences par l'épaisseur nécessaire. Des solutions résonnantes pourraient présenter une épaisseur moindre mais restent à bande étroite. Vis-à-vis de radars basse fréquence, les peintures chargées en ferrite exploitant les pertes magnétiques sont efficaces, mais leur coût et leur densité élevée limitent leur utilisation. Tous ces matériaux doivent bien sûr supporter les conditions d'environnement spécifiques à leur emploi, et ne pas se dégrader trop rapidement.

Les antennes doivent nécessairement contenir des diélectriques, créant des discontinuités avec la peau métallique (ou absorbante) du véhicule et par conséquent des diffractions supplémentaires ; elles peuvent faire l'objet de traitements comme l'adjonction de surfaces sélectives gommant cette discontinuité en dehors de la bande de fonctionnement de l'antenne.

Les armements classiquement emportés sous voilure avec laquelle ils interagissent en provoquant des points diffractants importants sont ici mis en soute ; les entrées d'air qui peuvent avec le conduit d'air et le compresseur en entrée du réacteur produire un effet de cavité significatif sont placées en extradors de la voilure, et donc masquées depuis le sol. La manœuvrabilité réduite du véhicule entraînée par ces formes, la perte d'efficacité des entrées d'air dans une phase de vol en incidence, sont alors des handicaps mineurs pour cet avion dont la seule mission est de pénétrer les défenses adverses sans être détecté.

Le concept d'aile volante est par ailleurs illustré aux USA avec le bombardier B2 de Northrop (1979), dont les formes inspirent également le développement plus récent de drones de combat, comme le démonstrateur Neuron de Dassault.

La furtivité est devenue une contrainte majeure de conception pour les principaux constructeurs dans le monde, elle entraîne nécessairement des compromis avec les autres caractéristiques des aéronefs militaires.



Figure 2 : le bombardier stratégique B2 – Source : Wikipedia.



Figure 3 : Démonstrateur de drone de combat Neuron en vol - © Dassault Aviation- A. Pecchi

## La Surface Equivalente Radar

Physiquement, le radar émet un champ électromagnétique porteur d'une énergie qui se propage vers la cible, et qui est diffracté par celle-ci dans toutes les directions de l'espace. Ce phénomène de diffraction électromagnétique caractérise la perturbation causée par la présence d'un obstacle dans un champ incident [5, 6, 7, 8].

Pour décrire ces effets de diffraction, on utilise la représentation d'une surface de captation fictive qui rerayonnerait de façon isotrope la puissance reçue et diffracterait dans la direction du radar la même puissance que la cible. Cette surface fictive est appelée Surface Equivalente Radar (SER, notée  $\sigma$ ) ou parfois Signature Radar, et s'exprime mathématiquement en fonction des champs incident  $E^i$  et diffracté  $E^d$  à distance  $R$  sous la forme :

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi \cdot R^2 \frac{|E^d|^2}{|E^i|^2}$$

Cette surface se mesure en  $m^2$ , elle caractérise l'écho radar reçu traduisant la présence de la cible qui est la signature de l'objet (cible). Elle ne dépend pas de la distance  $R$  cible-radar, car le champ diffracté  $|E^d|^2$  varie en  $1/R^2$  à grande distance.

## Relation entre SER et portée du radar

Il est bien connu que le bilan qui donne la puissance captée dans une liaison monodirectionnelle de type télécom varie avec l'inverse du carré de la distance ; la définition ci-dessus montre qu'une dépendance identique se produira sur le trajet retour, le bilan de liaison radar qui relie la puissance reçue à la puissance émise sera donc proportionnel à  $\sigma R^4$ .

La portée du radar correspond à la distance pour laquelle la puissance reçue produit le rapport signal-à-bruit minimal compatible avec le traitement de détection. Toutes choses égales par ailleurs, réduire à 10 km la portée d'un radar qui serait de 100 km pour une SER de 10  $m^2$  nécessiterait ainsi de réduire la SER à 0,001  $m^2$ , ce qui illustre la difficulté du problème...

**“ La furtivité devra de plus en plus être complétée par des techniques de guerre électronique ”**

## Le futur de la furtivité

Au-delà des améliorations incrémentales permises par le perfectionnement des simulations numériques, ou plus médiatiques (la cape d'invisibilité...) par la mise au point de métamatériaux élargissant la gamme des caractéristiques diélectriques ou magnétiques réalisables [10], de nouveaux concepts bien sûr couverts par le secret sont parfois évoqués dans la littérature ouverte, par exemple dans les revues Aviation Week, DSI, Air & Cosmos, mais leur crédibilité est incertaine. C'est le cas de la « furtivité active » qui consisterait à opposer vectoriellement à l'écho de peau du véhicule à protéger un écho artificiellement créé par un répondeur cohérent. Encore faudrait-il connaître très précisément cet écho de peau, dont on sait qu'il varie ra- ●●●

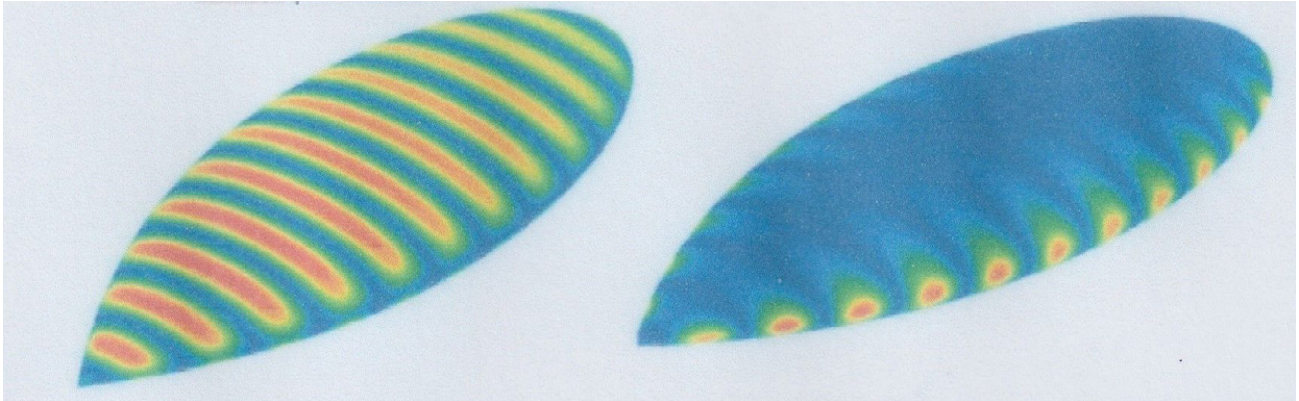


Figure 4 : Courants de surface (partie réelle) excités par un champ incident frontalement sur une surface métallique de référence selon la polarisation (verticale à gauche, horizontale à droite). La SER est produite par le rayonnement de ces courants. Source : workshop EM ISAE.

pidement, en phase notamment, avec la fréquence, l'incidence, la polarisation du champ incident qu'il serait nécessaire de caractériser en permanence.

La création d'un nuage de plasma absorbant autour d'un aéronef a également été médiatisée [11,12], faisant suite à des annonces russes, mais sa persistance dans le flux aérodynamique semble nécessiter un apport permanent d'énergie considérable. En outre ce plasma – ainsi que les parasites électriques liés aux hautes tensions nécessaires à sa créa-

tion – perturberait le fonctionnement de toute liaison ou capteur fonctionnant à bord dans une large gamme de fréquences.

## Conclusion

L'intérêt majeur des techniques de furtivité sur le plan opérationnel est de réduire le temps de réaction disponible pour l'adversaire, ce qui permet d'améliorer les chances de survie au combat, et d'exécution effective de la mission. La mise en œuvre de ces techniques, qui

peut réagir sur de nombreuses caractéristiques du véhicule, doit se faire de plus en plus dans une démarche d'ingénierie concourante.

Le développement en parallèle de nouveaux capteurs « anti-furtifs » pouvant par exemple exploiter de nouveau les basses fréquences, ou associer en réseau des radars multistatiques, voire passifs, nécessitera probablement de systématiser la combinaison des techniques de la furtivité avec celles de la guerre électronique. ■

## Les auteurs



**Jean-Louis Guiraud**, membre senior de la SEE, professeur des universités émérite. Chercheur associé à ISAE-SUPAERO, il a dirigé la recherche « Antennes pour satellites » au département Etudes d'antennes du CNET-La Turbie (06), pendant 11 ans comme Ingénieur en chef. Invité comme enseignant-chercheur à ENSICA, établissement sous tutelle du Ministère de la Défense, il dirige depuis 1990, pour la DGA et les industriels de l'armement, le Workshop « Signatures Radar ». Fondateur du congrès JINA, « International Symposium on Antennas », il est initiateur de nombreuses journées d'études pour la SEE Côte d'Azur et Midi-Pyrénées en électromagnétisme.



**Florent Christophe**, conseiller émérite au département Electromagnétisme et Radar de l'ONERA, dont il a dirigé les équipes toulousaines pendant une trentaine d'années. Il a présidé le conseil d'évaluation externe du métier Guerre Electronique de la Direction générale de l'armement et appartenu au Conseil de la science et de la technologie de l'OTAN. Il anime depuis 2015 un stage de formation continue sur la guerre électronique.

Actifs pendant des années au sein de la SEE, les 2 auteurs ont créé conjointement en son nom à Toulouse en 2006 les Journées Electromagnétisme et guerre électronique, dont la 8<sup>ème</sup> édition se tiendra en décembre 2021

## Le Professeur Pyotr Ufimtsev, un des parrains de la furtivité

A la fin des années 80, le sujet des « Avions furtifs » connut une popularité étonnante dans les médias et le grand public, avec la publication de la première photo de l'avion furtif F-117A en 1987 par la société Lockheed. Les spécialistes en construction aéronautique savaient depuis les années 70 que les industriels US de ce domaine travaillaient sur le type d'aéronefs afin de réduire leur détection par les radars.

Ce que l'on ne savait pas, c'était que les travaux pour la conception du premier avion furtif avaient été considérablement avancés, environ de 30 à 40 % d'après Alan Brown de chez Lockheed [3], en utilisant une méthode de calcul suffisamment performante compte tenu des ordinateurs alors disponibles, développée dans une monographie parue en 1962 sur la diffraction électromagnétique, par un auteur inconnu, P. Ufimtsev.

Ce professeur était membre de l'Institute of Radio Engineering and Electronics de l'Académie des Sciences de l'URSS. Il ignora l'utilisation de ses travaux par les Américains, dans le domaine de la furtivité, jusqu'à son arrivée aux Etats-Unis en 1990.

En France nous avons les traductions des revues soviétiques, et la plupart des articles du Professeur Ufimtsev traitaient de

la diffraction électromagnétique. Sa méthode était connue sous l'appellation : Physical Theory of Diffraction (PTD) [ 9], elle permettait notamment le calcul des densités de courants induits sur un obstacle diffractant. C'était particulièrement utile pour les comparaisons avec les résultats obtenus par d'autres méthodes, qui calculaient les mêmes courants induits. En 1971, la monographie originale de 1962 fut traduite en Anglais.

Au début des années 90, les médias US se sont emparés de cette histoire : un « savant » citoyen soviétique, avait « contribué à l'avion furtif américain » ! Cette gloire internationale facilita grandement son installation en Californie.

Par la suite, le Professeur Ufimtsev fut invité à deux reprises aux Journées Internationales de Nice sur les Antennes (JINA) organisées par le groupe régional Côte d'Azur de la SEE. Sa première conférence en 1992, sur le thème « *Black bodies and the problem of invisible object* », fut suivie d'une réaction enthousiaste de l'auditoire et la deuxième en 1998 « *Surface Waves in Absorbing Layers* », fut brillante, devant un public averti.\*

Aujourd'hui, P. Ufimtsev est Professeur à l'UCLA, et consultant chez Northrop Grumman. L'algorithmie optimisée pour la résolution des équations de l'électromagnétisme continue à progresser dans de nombreuses équipes, de même que la puissance des ordinateurs....

## Résumé

La supériorité aérienne des Etats-Unis ayant été défiée par le déploiement de nouvelles batteries de missiles au cours de la guerre du Vietnam, ceux-ci ont entrepris de mettre au point des avions furtifs, selon des méthodes de conception qui depuis un demi-siècle se sont perfectionnées grâce notamment au calcul électromagnétique à haute performance, au développement de nouveaux matériaux et à des concepts innovants. La quasi-totalité des vecteurs et plates-formes militaires modernes obéit ainsi à des contraintes de réduction de leur signature radar devant permettre leur survie sur le champ de bataille. ■

## Abstract

The deployment of new Surface to Air Missiles during Vietnam war having challenged air superiority of US forces, development of stealth aircraft was then decided. Their design rules have improved for half a century thanks to high performance electromagnetic computing, development of new materials as well as innovative concepts. Presently most military vehicles or platforms are facing strong radar cross section limitations in order to survive in the battlefield. ■

## Références

- [1] Y. Blanchard : « Le Radar 1904-2004 », Ellipses, 2004.
- [2] D. Richardson : « Les Avions furtifs », Atlas, 1990 ; « Stealth Airplanes », MIB , 2001.
- [3] B. Rich : « Skunk Works », Little, Brown and Co., 1994.
- [4] Crispin and Siegel : « Methods of Radar Cross Section Analysis », Academic Press, 1968.
- [5] Ruck, Barrick, Stuart, Kirchbaum : « Radar Cross Section Handbook », vol.1 et 2, 1970.
- [6] Knott, Shaefer, Tuley : « Radar Cross Section », Artech House, 1993.
- [7] Allen E. Fuhs : « Radar Cross Section Lectures », American Inst. of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [8] P. Ufimtsev : « Comments on Diffraction Principles and limitations, RCS Reduction Techniques, Proc. of IEEE, vol. 84, n°12, 1996.
- [9] J.L. Guiraud : « Une approche spectrale de la Théorie Physique de la Diffraction ». Annales des Télécommunications, vol. 38, n°3-4, 1983.
- [10] Schurig, Mock, Justice, Cummer, Pendry, Starr, Smith : « Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies », Science, vol. 314, pp. 977-980, 2006
- [11] Singh, Antony, Jha : « Plasma-based Radar Cross Section Reduction », Springer, 2016.
- [12] Bahman Zohuri : « Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology », Springer, 2020.