

Un avion furtif n'est pas invisible. C'est peut-être la chose la plus importante à comprendre avant d'aborder le sujet de la furtivité radar. La confusion entre discrétion et invisibilité est pourtant omniprésente, dans les médias comme dans certains débats stratégiques. Elle conduit à des affirmations aussi inexacts que « la furtivité est dépassée » ou, à l'inverse, « un appareil furtif est indétectable ».

La réalité est plus nuancée, plus intéressante, et entièrement gouvernée par la physique. Au cœur de cette physique se trouve un concept appelé Surface Équivalente Radar — la SER — devenue depuis l'avion de combat F-117 le critère distinctif des chasseurs dits de « 5^e génération ». Depuis, les avionneurs se livrent à une véritable course à la réduction de la signature radar. La SER est une grandeur contextuelle, qui ne prend de sens qu'associée à une fréquence électromagnétique, un angle précis, et une configuration précise : exprimée sans ce contexte, elle n'a aucune valeur. L'ignorer, c'est s'exposer à des comparaisons sans fondement et à des conclusions erronées.

Comprendre ce qu'est la SER — ce qu'elle mesure, ce dont elle dépend, et dans quelle mesure on peut la réduire — est la condition indispensable pour avoir un débat objectif sur le sujet.

La surface équivalente radar (SER)

La SER est une grandeur qui mesure la capacité d'un objet à réfléchir les ondes radar vers l'émetteur. Il s'agit d'une surface équivalente (exprimée en m²) correspondant à un objet idéal qui renverrait la même quantité d'énergie radar que la cible réelle.

La surface équivalente radar ne possède pas de forme géométrique propre : ce n'est ni un carré, ni un disque, ni la silhouette de l'objet. Le mètre carré constitue uniquement une unité de comparaison, et non une description physique.

La SER résulte de plusieurs mécanismes physiques, notamment la réflexion spéculaire, les phénomènes de résonance et la diffraction, dont les ondes rampantes se propageant le long des surfaces. La contribution de chacun de ces mécanismes dépend de la longueur d'onde, ainsi que de la taille, de la forme et des propriétés électromagnétiques de l'objet.

- **La réflexion spéculaire** (ou régime optique) est le mécanisme dominant lorsqu'une surface lisse et étendue est orientée perpendiculairement à l'onde radar incidente. À la manière d'un miroir, l'onde est réfléchie dans une direction privilégiée et renvoie une forte énergie vers le radar si l'angle d'incidence est favorable à une réflexion en direction du radar. Ce phénomène dépend fortement de la longueur d'onde par rapport aux irrégularités de surface : une surface considérée comme lisse à basse fréquence peut se comporter comme une surface rugueuse à plus haute fréquence, ce qui modifie fortement la réponse spéculaire. Les grandes surfaces planes ou légèrement courbées d'une cible — comme le fuselage d'un avion ou le flanc d'un navire — constituent des réflecteurs spéculaires potentiellement très efficaces. Elles peuvent générer des pics de SER très intenses, mais fortement directifs. Ce mécanisme devient prépondérant lorsque l'objet est beaucoup plus grand que la longueur d'onde et que la fréquence utilisée pénètre peu dans la matière. Typiquement, la réflexion spéculaire est majoritaire

lorsqu'un avion est détecté par un radar fonctionnant en bande X ou à des fréquences plus élevées.

- **Les phénomènes de résonance** apparaissent lorsque la longueur d'onde du signal radar est du même ordre de grandeur que les dimensions caractéristiques de l'objet, et/ou lorsque la fréquence est suffisamment basse pour permettre une pénétration dans les matériaux. Dans ce régime, l'onde interagit avec l'ensemble de la structure. Elle induit des oscillations électromagnétiques susceptibles d'amplifier ou d'atténuer fortement la SER en fonction de la fréquence. Contrairement au régime optique, où seules les surfaces externes dominent, le régime de résonance dépend de la géométrie globale et des propriétés électromagnétiques des matériaux (permittivité, perméabilité, conductivité), y compris celles des composants internes comme les moteurs. La SER peut alors varier fortement avec la fréquence, ce qui rend sa prédiction particulièrement complexe. Ce phénomène gagne en importance à mesure que la fréquence diminue et que la capacité de pénétration dans la matière augmente. Concrètement, la résonance devient le mécanisme dominant de la SER aux basses fréquences. C'est notamment par ce biais que des avions comme le F-117 ont pu être détectés par les forces serbes lors de la guerre du Kosovo, à l'aide d'un radar VHF P-18 (« *Spoon Rest* ») fonctionnant autour de 170 MHz. À l'opposé du régime de résonance, lorsque l'objet devient très petit devant la longueur d'onde on entre dans le régime de Rayleigh. Dans ce cas, l'onde « enveloppe » entièrement l'objet, ce qui entraîne une diffusion très faible. L'objet devient alors difficilement détectable. Ce phénomène explique pourquoi les plus petits drones sont pratiquement invisibles pour les radars de veille aérienne longue portée fonctionnant à des fréquences relativement basses.
- **La diffraction** intervient au niveau des discontinuités géométriques de l'objet : arêtes vives, coins, ruptures de courbure. Lorsqu'une onde électromagnétique rencontre ces singularités, elle est redistribuée dans un large cône d'angles, y compris en direction du radar, même en l'absence de réflexion spéculaire directe. Ce mécanisme, décrit par la théorie géométrique de la diffraction, peut constituer une contribution significative à la SER totale, notamment pour les cibles de forme aérodynamique dont les surfaces lisses sont peu favorablement orientées par rapport au radar. Les arêtes des ailes, les nervures du fuselage ou les jonctions de panneaux sont autant de sources de diffraction. La contribution diffractée est généralement moins intense qu'un pic spéculaire, mais elle reste présente sur une large plage angulaire, rendant la cible détectable sous différents angles. C'est notamment pour limiter ce phénomène que les appareils « *furtifs* » adoptent des formes très étudiées, dans lesquelles les arêtes vives sont évitées.
- **Les ondes rampantes** constituent un cas particulier de diffraction de surface. Lorsqu'une onde radar atteint le bord illuminé d'un objet courbe, une partie de l'énergie se propage le long de sa surface en suivant sa courbure, comme guidée par la géométrie. Ces ondes rampantes contournent la cible jusqu'à la zone d'ombre, puis se détachent en rayonnant à nouveau. Elles contribuent ainsi à la SER sous des angles d'incidence pour lesquels aucun mécanisme de réflexion spéculaire n'est actif. Ce phénomène est d'autant plus prononcé que la longueur d'onde est grande par rapport au rayon de courbure local, et que les propriétés électromagnétiques de la surface — notamment sa conductivité — permettent une propagation efficace le long du matériau.

Les ondes rampantes jouent un rôle non négligeable pour les objets de forme arrondie, comme les fuselages ou les radômes. Elles constituent également une source difficile à réduire par les seules techniques de mise en forme géométrique. Ce phénomène intervient notamment dans les capacités de détection des ailes volantes, comme le bombardier avion B-2, lorsqu'elles sont confrontées à des radars fonctionnant à de très basses fréquences. Il se combine alors avec les effets de résonance.

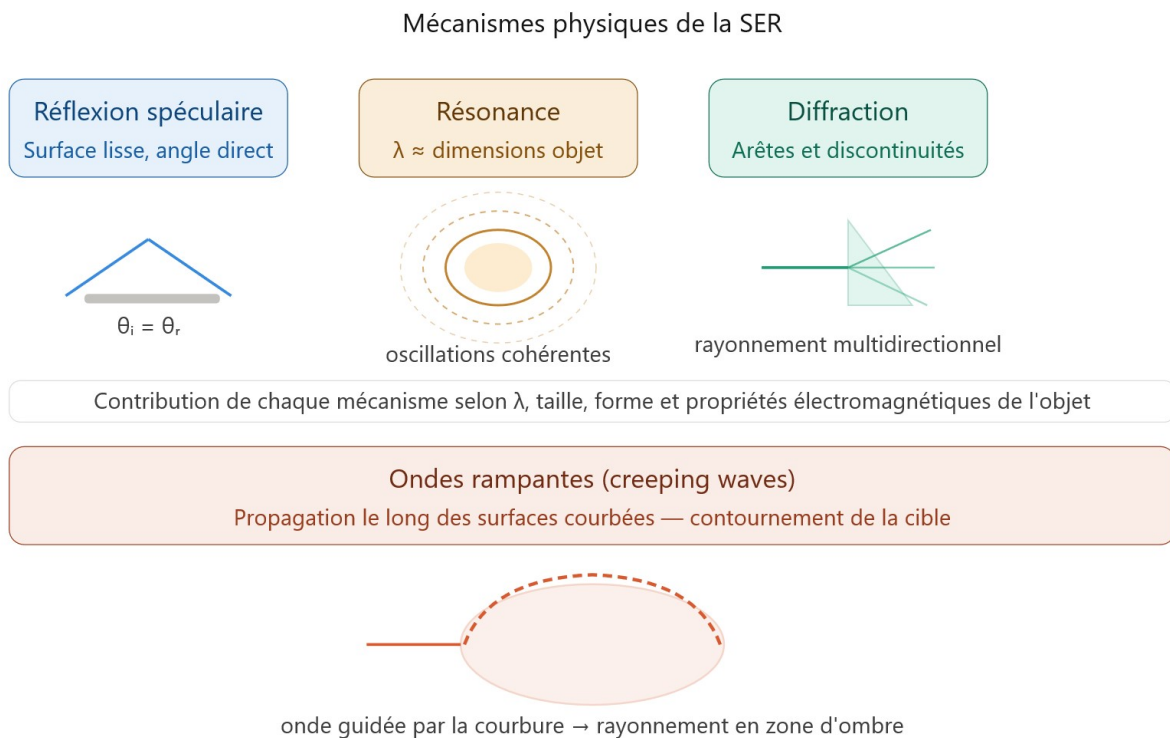


Schéma synthétisant les principaux principes physiques intervenant dans la SER.

À partir de ces notions, on comprend que la surface équivalente radar d'un objet peut varier fortement en fonction de la longueur d'onde du radar, mais aussi de l'angle d'incidence des ondes. En pratique, on observe des variations très importantes de la SER d'un angle à l'autre pour un même objet. Ces variations peuvent atteindre des facteurs de 100 à 1 000 de manière très rapide.

Il convient de noter que la SER des avions — en particulier ceux ayant fait l'objet d'un travail de réduction de signature — est généralement donnée pour l'angle où elle est la plus faible. Cette valeur n'est donc pas nécessairement représentative de la SER moyenne.

Le tableau suivant présente des ordres de grandeur des SER moyennes pour des chasseurs de quatrième et de cinquième génération.

Ces valeurs sont issues de calculs et de simulations et ne correspondent à aucun appareil en particulier. Lorsque la mention « *moyen* » est utilisée, elle désigne une moyenne de la SER tout

autour de l'appareil. Cette valeur peut toutefois varier d'un facteur 100 à 1 000 selon l'angle considéré.

La référence de calcul OTAN correspond à la valeur de SER utilisée pour déterminer la portée maximale d'un radar telle que définie dans le STANAG (*Standardization Agreement*) correspondant.

SER (m²) d'avions de chasse (configuration réaliste)					
Bande	SER de référence de calcul de l'OTAN	Lisse (sans emport) moyen 4e gén.	Lisse (sans emport) de face 4e gén.	Avec armement 4e gén.	5e gén. moyen soutes fermées
X (8-12 GHz)	1	5 - 10	0,5 - 1,5	15 - 30	0,001 - 0,01
C (4-8 GHz)	2	5 - 8	0,7 - 2	12 - 25	0,01 - 0,05
S (2-4 GHz)	5	3 - 6	1 - 3	8 - 15	0,01 - 0,1
L (1-2 GHz)	10	8 - 20	3 - 8	15 - 35	0,1 - 0,5
VHF (200-400 MHz)	20	20 - 200	10 - 50	50 - 400	1 - 5

On peut d'abord constater que, d'un point de vue physique, la SER tend à augmenter lorsque la fréquence du radar diminue. Cela s'explique directement par les effets des différents phénomènes décrits précédemment.

Ensuite, il apparaît peu pertinent de comparer la SER d'un avion de quatrième génération à celle d'un avion « *furtif* » (5^e gén.). En effet, l'armement emporté sous voilure a une influence majeure sur la signature radar. Les appareils dits « *furtifs* », qui emportent leurs munitions en soute, ne sont pas soumis à cette contrainte. Comparer leurs SER revient donc, en pratique, à comparer la signature radar d'un appareil non armé à celle d'un avion armé. On notera également que tout emport externe augmente fortement la signature radar.

On comprend ainsi tout l'intérêt des radars fonctionnant en bande basse pour détecter des cibles à faible SER, à condition que leurs dimensions restent suffisantes et que l'on ne se situe pas dans le régime de Rayleigh.

Enfin, cela signifie qu'il est plus facile de réduire la SER de petits objets que celle de grands. Concrètement, il est plus aisé de rendre discret un drone qu'un bombardier stratégique.

Impact sur la détection des radars

La distance de détection d'un radar n'est pas proportionnelle à la SER : elle suit une loi en racine quatrième :

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \right)^{1/4}$$

σ : SER de la cible

P_t : puissance émise

G : gain de l'antenne

λ : longueur d'onde

S_{min} : seuil de détection

Concrètement, un radar capable de détecter une cible ayant une SER de 5 m² à 450 km pourra détecter une cible de 2 m² à environ 360 km, une cible de 0,01 m² à 95 km et une cible de 0,001 m² à 55 km.

Il faut donc diviser la SER par 16 pour que la portée de détection soit divisée par 2, et par 100 pour obtenir une portée réduite d'environ un facteur 3,2.

Cela montre à quel point la réduction de la surface équivalente radar est un défi exigeant. Pour obtenir un effet opérationnel significatif, il ne suffit pas de diminuer légèrement la SER : il faut la réduire de manière très importante.

Un autre élément essentiel à prendre en compte est le seuil de détection des radars. Un radar ne possède pas de seuil fixe exprimé directement en SER. En réalité, il détecte une cible lorsque le signal reçu dépasse un certain rapport signal/bruit (SNR), généralement de l'ordre de 10 dB pour une détection fiable. En dessous de ce seuil, le taux de fausses alarmes devient élevé.

La SER n'intervient qu'indirectement, puisqu'elle conditionne la puissance de l'écho renvoyé vers le radar. En pratique, cela signifie que la « *SER minimale détectable* » dépend fortement de la distance, selon une loi en R⁴ : plus une cible est éloignée, plus sa SER doit être élevée pour être détectée.

Ainsi, un radar moderne peut théoriquement détecter des cibles de l'ordre de 0,001 m² à courte portée, mais plutôt quelques m² à sa portée de détection maximale.

Par ailleurs, sans traitement du signal, le radar serait submergé par des échos parasites (oiseaux, pluie, végétation). C'est pourquoi des techniques comme le filtrage Doppler, les algorithmes CFAR (*Constant False Alarm Rate*) et le suivi de piste sont utilisées pour discriminer les véritables cibles des échos parasites.

En conséquence, un appareil à la SER suffisamment réduite peut rester théoriquement indétectable tant que son écho reste en dessous du seuil de détection du radar. Cela illustre toute la difficulté à laquelle sont confrontés les radars dédiés à la détection des drones, qui doivent opérer à la limite des faux échos (**Olivier Dujardin, Lauraline Maniglier, [Drones et lutte anti-drone](#), ISBN : 9782340106024**).

Intérêt opérationnel de la furtivité radar

L'intérêt opérationnel se décline à plusieurs niveaux.

D'abord, un radar au sol est conçu pour surveiller un espace donné, généralement assimilable à un cercle dont le rayon correspond à sa portée maximale — éventuellement réduite en cas de recouvrement avec d'autres radars.

Si la portée de détection d'une cible est divisée par deux (ce qui correspond à une réduction de sa SER d'un facteur 16), la surface surveillée est alors divisée par quatre, soit une réduction de 75 %. Opérationnellement, cela offre davantage de possibilités pour pénétrer discrètement un espace aérien surveillé. De plus, même en cas de détection, celle-ci intervient plus tard, privant le défenseur d'autant de préavis pour se préparer. Ce gain de temps peut, à lui seul, faire la différence entre la réussite et l'échec. Une détection trop tardive peut par exemple ne pas laisser au défenseur le temps de faire décoller sa chasse, une réaction qui aurait été possible sans cette réduction de SER.

Ensuite, dans le domaine de la défense sol-air, la réduction de la SER diminue les distances d'engagement. Elle permet donc de s'approcher davantage d'un système de défense sans s'exposer immédiatement. Cela peut rendre possible l'emploi d'armements qui n'auraient pas eu la portée suffisante sans cette réduction de signature.

Ce raisonnement s'applique également aux missiles de croisière et aux drones, qui augmentent ainsi leurs chances d'atteindre leur objectif sans être détectés ni interceptés.

En combat aérien, l'intérêt principal est de retarder la détection par l'ennemi afin de pouvoir engager en premier. Cela contribue également à améliorer la survivabilité face aux missiles sol-air et air-air.

Même lorsqu'un appareil est détecté par un avion ou un système sol-air, le guidage du missile peut être perturbé. Les engagements à longue distance reposent généralement sur des autodirecteurs électromagnétiques, qu'ils soient semi-actifs ou actifs.

Avant que le missile ne puisse détecter la cible de manière autonome, il est guidé par une liaison de données qui le rapproche de celle-ci. Les autodirecteurs semi-actifs, qui exploitent l'écho radar d'un illuminateur, doivent alors capter un signal fortement atténué, parfois inférieur à leur seuil de détection.

De même, les autodirecteurs actifs — plus compacts, donc moins puissants, et fonctionnant à des fréquences élevées — sont plus sensibles aux matériaux absorbants et peuvent éprouver des difficultés à acquérir la cible de manière autonome. Dans ce cas, tout dépend de la capacité du radar de guidage à amener le missile au plus près de la cible.

On peut noter que c'est l'une des raisons pour lesquelles des systèmes comme les S-300, S-400 ou encore HQ-9, HQ-19 et HQ-22 utilisent des missiles dotés de charges militaires importantes. Ceux-ci peuvent être guidés vers des cibles détectées par des radars fonctionnant à des fréquences plus basses, donc moins sensibles aux techniques de réduction de SER.

La moindre précision de ces radars est compensée par une charge explosive plus élevée, qui ne nécessite pas une précision métrique pour neutraliser la cible. Elle permet également de traiter plusieurs cibles proches, même lorsque le radar ne distingue qu'un seul écho « *élargi* ».

Cette approche diffère de celle adoptée par les États-Unis, qui ont privilégié, notamment avec les dernières versions du système Patriot (PAC-3 CRI et MSE), une réduction de la taille des ogives et des missiles au profit d'une logique de « *hit-to-kill* », fondée sur l'impact direct. Si cette méthode est plus précise, elle peut aussi être plus sensible aux effets de réduction de SER.

De son côté, la France a fait évoluer son système SAMP/T avec l'adoption du radar *Ground Fire 300*, fonctionnant dans la bande des 3 GHz. Cette gamme de fréquence est moins sensible aux effets de la furtivité que celle du radar Arabel, qui opère en bande X, plus vulnérable à ces techniques.

Les limites de la furtivité radar

Comme on l'a vu, à mesure que la fréquence des radars diminue, il devient de plus en plus difficile de réduire la SER, jusqu'à atteindre des limites imposées par la physique elle-même.

En effet, plus on cherche à absorber les ondes sur une large bande de fréquences, plus le matériau absorbant doit être épais afin de compenser la capacité des ondes à pénétrer la matière. Il existe une limite physique théorique à ce compromis, connue sous le nom de « *borne de Rozanov* », que les ingénieurs ne peuvent pas dépasser avec des matériaux passifs classiques.

En pratique, rendre un appareil discret face à des radars fonctionnant autour de 200 MHz nécessiterait des épaisseurs très importantes — de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres, contre moins d'un millimètre en bande X et au-delà — ce qui est incompatible avec les contraintes de conception d'une plateforme aérienne.

On peut donc considérer que la furtivité radar devient relative face aux radars en bande basse, c'est-à-dire dont la fréquence est inférieure au GigaHertz. Ces radars présentent un intérêt certain pour la détection à longue distance de cibles à faible SER, mais ils ont aussi des inconvénients, notamment leur taille importante et leur faible capacité à détecter de petits objets.

Ces radars ne sont toutefois pas la seule limite pour les avions « *furtifs* ». Aujourd'hui, la réduction de la SER repose principalement sur la géométrie des appareils, qui vise à dévier les ondes radar dans des directions autres que celle de l'émetteur, plutôt que sur leur absorption.

En effet, les matériaux absorbants actuellement disponibles — souvent à base de structures ferromagnétiques et/ou de graphène — restent encore éloignés des performances théoriques liées à la borne de Rozanov. Ils nécessitent plusieurs millimètres d'épaisseur pour atteindre une absorption maximale d'environ 20 dB en bande X. De plus, ils sont relativement lourds (2 à 3 g/cm³), coûteux et fragiles.

En conséquence, sur un avion « *furtif* », la majorité des ondes radar n'est pas absorbée mais déviée dans d'autres directions. Ces ondes restent donc détectables à condition de disposer de capteurs positionnés différemment. C'est le principe des radars multistatiques et des radars passifs.

Dans le cas des radars passifs, l'émetteur n'est pas dédié : il s'agit d'un émetteur d'opportunité. Ces systèmes permettent ainsi de détecter des cibles même lorsque l'énergie est réfléchiée dans des directions différentes de celle de l'émetteur initial.

Ces radars présentent eux aussi des contraintes, mais ils offrent des alternatives intéressantes pour la détection des avions à faible SER. En revanche, ils restent sensibles aux techniques d'absorption des ondes : ils permettent de contrer la furtivité de forme, mais pas celle liée aux matériaux absorbants.

Face à ces limites des approches passives, des pistes alternatives ont été explorées, dont deux méritent d'être mentionnées :

- **La furtivité par annulation active** repose sur le principe de l'interférence destructive : il s'agit d'émettre un signal électromagnétique de même intensité, parfaitement en opposition de phase, afin d'annuler l'écho radar renvoyé par la cible. Le concept est séduisant et a parfois été improprement attribué au système de guerre électronique SPECTRA du Rafale, mais sa mise en œuvre est extrêmement complexe et contraignante. En effet, l'annulation doit être précise en amplitude, en phase et en direction, pour chaque fréquence radar susceptible d'illuminer la cible, et ce en temps réel. Ces exigences rendent le système très sensible aux variations de fréquence et d'angle d'incidence, ce qui limite fortement son efficacité opérationnelle dans un environnement radar dense et varié.

À cela s'ajoute la difficulté de mesurer avec précision le niveau d'énergie à restituer en direction du radar. Les puissances reçues étant très faibles, le traitement numérique impose plusieurs étages d'amplification et d'atténuation du signal, ce qui rend impossible une

estimation fiable de l'énergie incidente. Combinées aux erreurs de mesure de phase induites par les multitrajets et à l'imprécision sur la direction d'arrivée du signal, ces limitations font qu'un tel dispositif serait aujourd'hui contreproductif : plutôt que de réduire la signature radar, il ne ferait qu'augmenter artificiellement la SER. À ce jour, aucune application opérationnelle connue n'a été confirmée.

- **La furtivité par plasma froid** consiste à envelopper tout ou partie de l'aéronef dans une couche de plasma — un gaz ionisé — susceptible d'absorber ou de diffracter les ondes radar. Des recherches ont été conduites notamment en Russie dès les années 1990. En théorie, un plasma suffisamment dense peut atténuer significativement la réflexion radar.

En pratique, générer et maintenir un plasma stable à la surface d'un avion en vol pose des problèmes considérables : consommation énergétique, uniformité du revêtement, tenue aux hautes vitesses, sans oublier la signature thermique et électromagnétique propre au plasma, susceptible de trahir l'appareil autant que de le protéger. Par ailleurs, l'épaisseur et la température du plasma doivent être parfaitement contrôlées pour une longueur d'onde donnée, un réglage qui peut simultanément dégrader la discrétion face à d'autres fréquences et augmenter artificiellement la SER. À l'instar de l'annulation active, cette technologie n'a, à ce jour, pas démontré de maturité opérationnelle.

La surface équivalente radar d'un objet est un paramètre complexe, qui dépend autant des caractéristiques propres de l'objet que de la fréquence utilisée par le radar.

L'intérêt opérationnel de la furtivité radar est bien réel : bien qu'il existe d'autres moyens de détection, notamment infrarouges, aucun ne permet aujourd'hui d'espérer détecter une cible à plusieurs centaines de kilomètres, et ce dans des conditions météorologiques variées, avec une efficacité comparable à celle du radar.

Quelles que soient les alternatives, rien ne peut, à ce jour, remplacer pleinement le radar, qui devrait rester encore longtemps un pilier de la détection.

Les radars « *quantiques* » n'ont pas été abordés ici car, malgré certaines annonces — notamment chinoises — et quelques publications scientifiques peu concluantes, ils demeurent à l'état théorique. Leur faisabilité reste à démontrer, et leur développement nécessitera encore des avancées majeures. À ce jour seule la Chine, la Canada et l'Inde ont lancés officiellement des programmes de recherche dans cette technologie.

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'il est d'autant plus facile de rendre un objet furtif qu'il est de petite taille. Les matériaux absorbants présentent des limites physiques théoriques, mais les marges de progression restent importantes, tant les solutions actuelles sont encore éloignées des limites imposées par la borne de Rozanov.

La furtivité n'est ni morte ni dépassée : elle doit continuer à être améliorée, mais surtout adaptée aux objets pour lesquels elle est la plus pertinente.