

[RECHERCHE]

Groupe d'Études Scientifiques et Techniques

TECHNOLOGIES D'OBSERVATION DE LA TERRE : FOCUS SUR L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE ET LA DÉTECTION RADAR



Par Tristan Bourdon & Morgan Bertin

Sous la supervision d'Antoine Hallez, chef de projet Espace du Groupe d'études scientifiques et techniques

À PROPOS DE LA RECHERCHE

Cet article est publié par le Groupe d'études scientifiques et techniques des Jeunes de l'IHEDN. Créé début 2025, il vise à fédérer et développer les activités scientifiques et techniques de l'association. L'objectif est de rendre accessible à un public intéressé les enjeux technologiques du milieu de la défense.

Les enjeux de l'observation de la Terre depuis l'espace à des fins de sécurité et de défense deviennent de plus en plus importants à mesure que les conflits de haute intensité reviennent ou que les catastrophes naturelles et le changement climatique frappent de plein fouet les populations. Afin de mieux comprendre les technologies utilisées pour l'observation de la Terre, cette publication a pour but de vulgariser les grands principes de l'observation de la Terre. Nous cherchons ici à expliquer en détails les concepts physiques et les missions liées à l'imagerie hyperspectrale et à la détection radar.

Table des matières

Introduction : L'observation de la Terre.....	5
Principes de base de la mécanique spatiale	5
L'imagerie hyperspectrale	8
La détection radar.....	12
Intérêt des radars spatiaux	
Principe physique	
Comprendre les contraintes physiques	
Le rapport Signal-à-bruit	
Orienter les cibles	
Les grands avantages par rapport à l'optique	
Les images « SAR »	
Conclusion.....	21

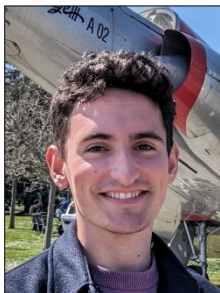
À PROPOS DES AUTEURS



Tristan Bourdon est étudiant ingénieur à l'ISAE-SUPAERO. Il a aussi suivi un bachelor sur l'atmosphère polaire et la télédétection spatiale à l'UNIS (*The University Centre in Svalbard*).

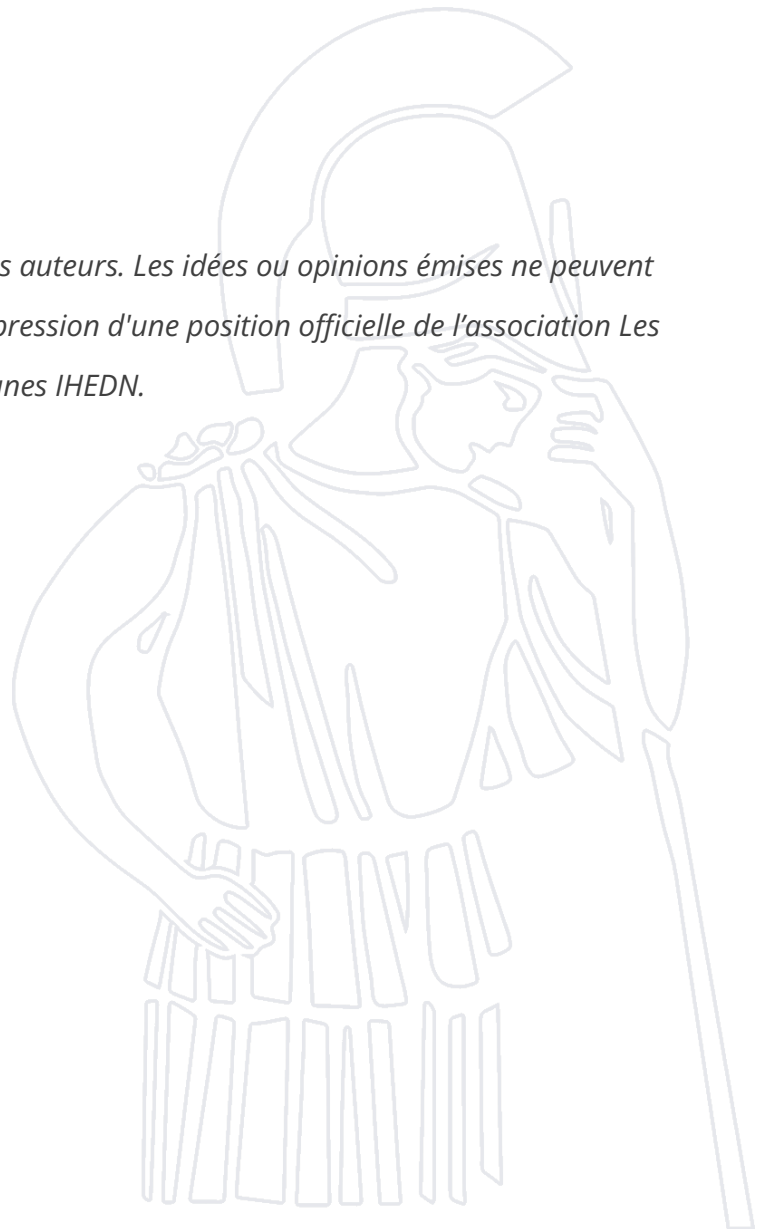


Morgan Bertin est apprenti ingénieur de l'ISAE-SUPAERO, spécialisation systèmes embarqués pour l'aérospatial.



Antoine Hallez est étudiant ingénieur à l'ISAE-SUPAERO, spécialisé en observation de la Terre et en conception-opérations des systèmes spatiaux. Il a aussi réalisé un double-diplôme à Sciences Po Paris.

Ce texte n'engage que la responsabilité des auteurs. Les idées ou opinions émises ne peuvent en aucun cas être considérées comme l'expression d'une position officielle de l'association Les Jeunes IHEDN.



Introduction : L'observation de la Terre

Depuis la Guerre Froide, l'utilisation de la haute altitude et de l'espace pour l'observation de la Terre a toujours été un sujet central. Le lancement du satellite Spoutnik-1 en 1957 a suscité beaucoup d'inquiétudes quant à la capacité de l'URSS à récupérer du renseignement électromagnétique, tandis que le Lockheed U-2 a joué un rôle primordial dans la crise des missiles de Cuba en photographiant les rampes de lancement¹. Depuis, les outils d'observation de la Terre ont sans cesse évolué, en restant à la pointe de la technologie et en étant intégré sur de nombreuses plateformes spatiales et aéroportées. Les missions de ces instruments se sont aussi diversifiées, avec beaucoup de plateformes aux applications duales (à la fois civiles et militaires). La surveillance du changement climatique, des mouvements de populations ou des accès aux ressources sont autant de raisons de développer de nouveaux outils, satellites voire de constellations. Ainsi, Les acteurs impliqués se multiplient et les coûts de développement et des opérations se réduisent.

L'observation de la Terre se fait essentiellement via des outils optiques et de télédétection. Les outils optiques sont principalement des caméras très haute définition, des télescopes ou des systèmes d'analyse spectrale, nous expliquerons ce type d'outils avec l'exemple de l'imagerie hyperspectrale. Les outils de télédétection quant à eux peuvent être actifs (émission et réception de signaux) ou passifs (réception de signaux uniquement). Ces systèmes peuvent se concentrer sur la détection électromagnétique (signaux radios, télécommunications) ou bien utiliser la télémétrie (radar, LiDAR) pour reconstituer des images ou des reliefs. Nous nous concentrerons ici sur la détection radar.

Principes de base de la mécanique spatiale

Afin de bien comprendre les enjeux liés aux plateformes satellitaires, il est nécessaire de connaître les principaux paramètres et caractéristiques d'une mission spatiale. Parmi les

¹ « Cuban Missile Crisis ». *National Museum of the United States Air Force* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/197542/cuban-missile-crisis/>.

critères déterminants pour préparer une mission spatiale on peut citer l'altitude, le type ou l'inclinaison de l'orbite.

Pour des systèmes d'observation de la Terre, le choix de l'altitude d'orbite se base sur un compromis entre la résolution voulue, la surface de couverture et la traînée induite par l'atmosphère. Afin d'avoir une résolution plus grande et donc des images plus détaillées, on souhaite avoir une altitude basse pour être au plus proche des zones à observer. Cependant, plus on s'approche de la zone d'intérêt, et plus le champ d'observation se resserre et la surface couverte est faible. Cela peut aussi avoir un effet sur les liaisons avec le sol pour le transfert de données et de commandes, car moins de stations au sol sont visibles lorsque l'on diminue l'altitude d'orbite.

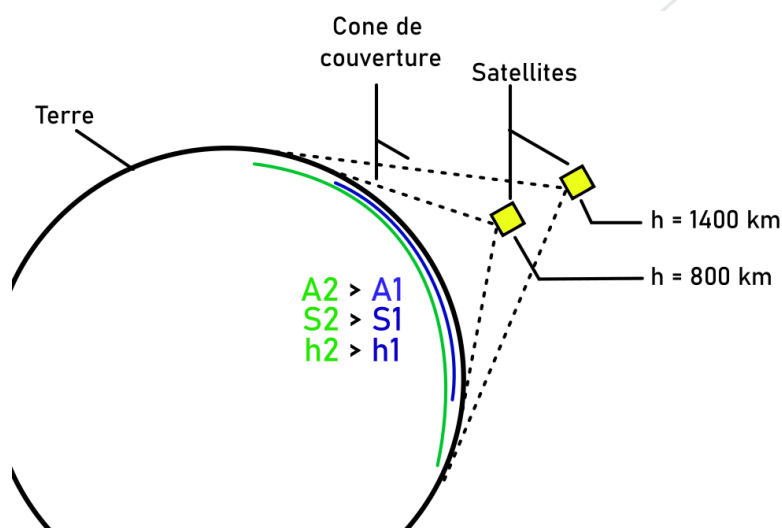


Schéma de l'augmentation de la couverture en fonction de l'altitude

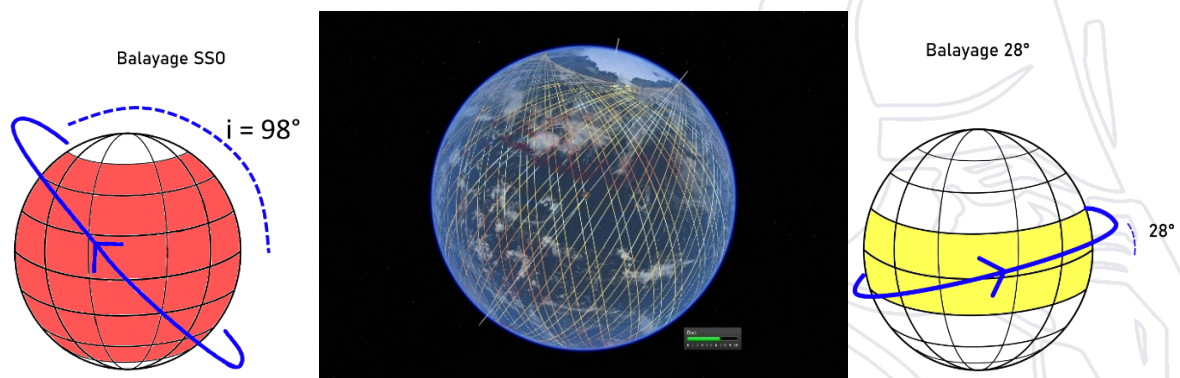
On définit souvent l'espace comme la zone située au-delà de la ligne de Kármán, à 100km d'altitude², car c'est autour de cette altitude que les surfaces portantes des avions classiques ne sont plus efficaces. Pour autant, les plateformes en orbite basse ou LEO (Low Earth Orbit, altitudes < 800 km), dont font partie les satellites d'observation de la Terre, sont toujours concernées par les effets de traînée liés à l'atmosphère, et sont d'autant plus importants que l'altitude est basse. Les corrections d'altitude nécessitant du

² Dr. S. SANZ FERNANDEZ DE CORDOBA. « 100km Altitude Boundary for Astronautics », Fédération Aéronautique Internationale [en ligne], 21 juin 2004 [consulté le 09/04/2025]. Disponible sur : <https://www.fai.org/page/icare-boundary>.

carburant et donc de la charge utile, il est essentiel de bien choisir l'altitude d'orbite en fonction de la quantité de carburant dimensionnée pour la mission.

L'inclinaison de l'orbite représente aussi un critère important de la préparation de mission. Elle représente l'angle réalisé entre l'orbite et l'équateur, ou la latitude maximale atteinte par un satellite lors d'une orbite. En fonction des zones que l'on souhaite couvrir, on va donc choisir une inclinaison et un type d'orbite qui favorisent une couverture globale ou bien une concentration autour de certaines zones. Pour visualiser les zones couvertes par un satellite, on peut regarder sa trace au sol.

Plus un satellite s'approche de l'orbite polaire (inclinaison de 90° , passage au-dessus des pôles) et plus il aura de latitudes couvertes, cependant le lancement devient plus coûteux car il ne profite pas ou peu de l'effet de fronde lié à la rotation de la Terre.



Trace au sol du satellite Sentinel-6 de la mission Copernicus³ et principe de l'inclinaison

Enfin, on peut citer les types d'orbite héliosynchrones et géostationnaires qui peuvent être utilisés pour l'observation de la Terre. Une orbite héliosynchrone ou SSO (*Sun-Synchronous Orbit*) est une orbite quasi-polaire qui permet d'observer la Terre avec une exposition solaire constante et donc à une heure locale fixée. Cela permet d'assurer un éclairage similaire à chaque passage sur une zone d'intérêt et ainsi faciliter la comparaison de clichés lors de différents passages, l'influence du moment de la journée étant écartée. Une orbite géostationnaire ou GEO (*Geostationary Earth Orbit*) correspond

³ Crédits : European Space Agency ESA/ATG medialab. Disponible sur : https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/Copernicus_Sentinel-6_orbital_tracks

à une orbite à une altitude fixe de 35 786km au niveau de l'équateur, permettant de rester constamment au-dessus d'un point fixe sur la Terre. Sa trace au sol sera donc simplement un point sur l'équateur. Ce type d'orbite permet une couverture continue d'environ 1/3 de la surface terrestre avec un satellite, facilitant l'accès aux images en temps réel. Elle est utile pour prendre des clichés de zones très étendues mais cela la rend peu adaptée à l'imagerie de précision.

L'imagerie hyperspectrale

Résumé de la technologie

L'objectif de l'imagerie hyperspectrale est d'obtenir un ensemble d'images qui sont fonction de la longueur d'onde avec lesquelles elles sont observées. Lors d'une prise d'image classique un ensemble de lentilles et/ou de miroirs est utilisé afin d'obtenir une image avec des caractéristiques précises (grossissement, distance focale, ouverture...). Le principe de l'imagerie hyperspectrale est d'ajouter à cet ensemble un système capable de dissocier les longueurs d'ondes présentes dans le faisceau lumineux incident. Cela est typiquement réalisé à l'aide d'un prisme ou d'un réseau de diffraction. L'avantage de cette technologie est qu'elle permet de déterminer la composition chimique, et donc d'identifier, les éléments présents sur l'image. En effet, chaque élément chimique émet ou réfléchit de la lumière sur des bandes spectrales qui lui sont propres. Ainsi, en choisissant les bonnes bandes spectrales à étudier, on peut également discriminer l'herbe, le bitume, les plastiques et les métaux, permettant par exemple d'identifier des obstacles, des bâtiments ou des véhicules, ou de discriminer une cible d'un leurre.

Principe physique

Chaque faisceau de lumière peut être décomposée en un spectre lumineux, c'est-à-dire en une certaine intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence. Pour l'imagerie, on parle souvent du spectre visible (environ 400 à 800 nm), de l'infrarouge (800 nm à 100 μ m) ou de l'ultraviolet (1 à 400 nm). Pour réaliser un spectre lumineux, il

faut d'abord séparer les différentes longueurs d'ondes comprises dans le faisceau lumineux. Pour cela, on utilise généralement un prisme ou un réseau de diffraction qui ont des comportements dispersifs, c'est-à-dire qu'ils n'agissent pas de la même manière en fonction de la longueur d'onde. On obtient alors des spectrogrammes.

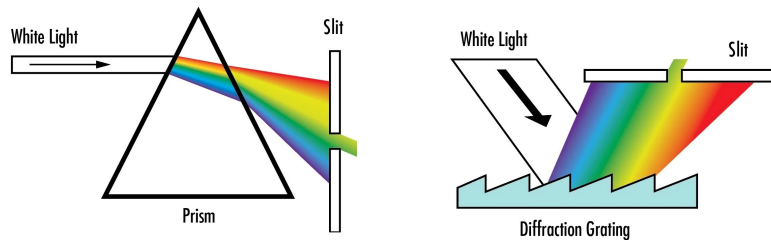
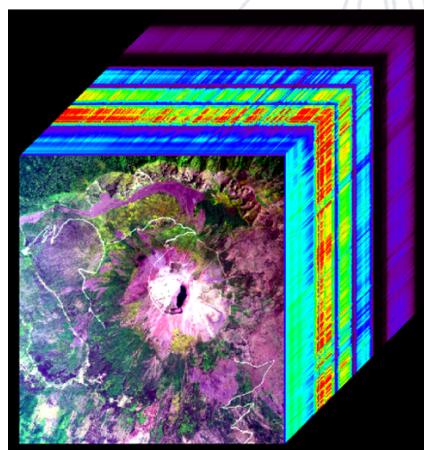


Schéma explicatif du phénomène de diffraction avec un prisme et un réseau de diffraction⁴

Lors d'une prise d'image classique, chaque position du capteur (pixel) est associée à une couleur/longueur d'onde, et l'image finale en 2 dimensions est un regroupement de tous ces pixels. Dans le cas de l'imagerie hyperspectrale, on peut parfois entendre parler de « cube hyperspectral ». Contrairement à une image classique, chaque pixel contient ici toute l'information spectrale (le spectrogramme), on ajoute donc une troisième dimension à l'image, celle de l'intensité lumineuse, d'où l'appellation de « cube » hyperspectral.



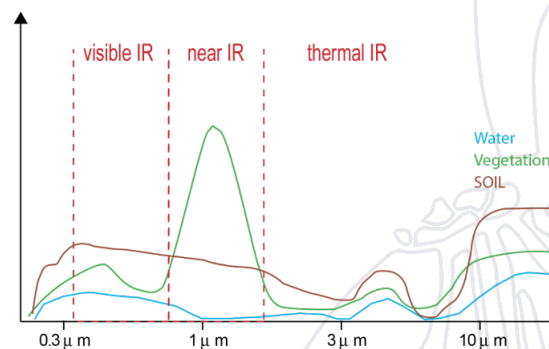
Représentation d'un cube hyperspectral pour une image du Vésuve par l'outil AVIRISng⁵

⁴ « Tout savoir sur les réseaux de diffraction ». *Edmund Optics* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.edmundoptics.fr/knowledge-center/application-notes/optics/all-about-diffraction-gratings/>.

⁵ Crédits : NASA / JPL avirisng.jpl.nasa.gov.

La réalisation d'une image hyperspectrale est un défi technologique dans la mesure où il n'est pas possible de récupérer l'information spatiale et spectrale en même temps. Deux techniques existent alors. On peut prendre une image simple à une longueur d'onde donnée, et faire un balayage en fonction de la longueur d'onde. Il faut ainsi toujours viser la zone d'intérêt lors de la succession de prise d'image, ce qui nécessite des dispositifs de visée complexes, comme des miroirs inclinables. Une autre technique, celle du balai brosse ou *push broom*, consiste à récupérer l'information spectrale sur une ligne, et à balayer la seconde dimension spatiale avec l'instrument de mesure en faisant avancer la plateforme.

Pour analyser les images hyperspectrales produites par ces instruments, on peut alors choisir les bandes spectrales d'intérêt pour mettre en lumière les éléments importants que l'on cherche à identifier.



Représentation de spectrogrammes caractéristiques de l'eau, de la végétation et du sol.

Réflectance en fonction de la longueur d'onde⁶

Les missions de l'imagerie hyperspectrale

Plusieurs nations ont développé cette technologie à des fins de sécurité et de défense, qui se retrouve depuis intégrée dans plusieurs missions spatiales et aéroportées. C'est le cas par exemple des USA avec *AVIRIS*, de la Chine avec le satellite *HJ-1B*, ou du Japon et de

⁶ « The Electromagnetic Spectrum ». *Belgian Earth Observation* [en ligne]. Disponible sur : <https://eo.belspo.be/en/electromagnetic-spectrum>.

son satellite *ALOS-3*. En Europe, l'Italie et l'Allemagne possèdent respectivement les récents satellites *PRISMA* et *EnMAP*. En France, cette technologie a vu le jour dès 2007 dans le cadre d'un partenariat entre l'ONERA et l'Institut d'Optique. Le programme Copernicus devrait quant à lui s'étendre avec la mission *CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment)*, intégrant les satellites *CHIME-A* et *CHIME-B*, de la deuxième génération de Sentinel⁷. L'ensemble de ces instruments utilisent la technique du *push broom* pour réaliser l'imagerie hyperspectrale, et leurs plateformes sont sur une orbite héliosynchrone entre 600 et 700 km d'altitude.

Les missions des instruments hyperspectraux peuvent être très variées. Dans le domaine de la défense, on peut évidemment citer le renseignement. Grâce aux possibilités accrues d'identification qu'elle apporte, l'imagerie hyperspectrale est un complément aux instruments optiques classiques particulièrement intéressant pour les services de renseignement qui les utilisent. D'autant plus que l'intégration d'outils d'analyse d'images ou la préparation de mission peuvent accroître les capacités de ces systèmes, en sélectionnant directement les longueurs d'ondes d'intérêt en fonction des cibles, et en augmentant la densité spectrale dans ces zones.

D'autres missions pour lesquelles ces systèmes sont particulièrement utilisés sont la sécurité des populations et la sécurité alimentaire. En effet, dans le cadre de catastrophes naturelles, il est possible de suivre ou de prédire l'évolution de phénomènes (mouvements de terrain, inondations, incendies...) en mesurant certains éléments qui ne sont pas dans le domaine visible, en particulier dans des zones non accessibles aux services de secours. De même, il est possible soutenir le secours aux personnes à la suite de ces catastrophes, en identifiant les zones où sont coincées les victimes, et ainsi concentrer les efforts dans les zones importantes. Pour ce qui est de la sécurité alimentaire, l'imagerie hyperspectrale permet entre autres de suivre la densité, la hauteur ou la teneur en eau des plantations, l'hygrométrie des sols, la déforestation ou même les mouvements océaniques et donc les évolutions des populations de poissons. C'est donc

⁷ « CHIME ». *Copernicus* [En ligne]. Disponible sur : <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/chime>.

une solution privilégiée pour prédire les récoltes ou les accès aux ressources, ainsi que pour optimiser le choix des zones de culture et des méthodes d'exploitation.

La détection radar

Intérêt des radars spatiaux

Les radars spatiaux représentent un atout stratégique essentiel pour la défense. Leur capacité à opérer en toutes conditions – qu'il s'agisse de la nuit, sous des nuages épais ou par mauvais temps – assure une surveillance continue du monde. Cela permet non seulement de détecter et de suivre en temps réel des cibles potentielles, mais également d'anticiper tout mouvement suspect ou toute activité hostile, même dans des environnements où les capteurs optiques traditionnels seraient inefficaces. Cette fiabilité dans la collecte d'images détaillées du sol offre aux forces armées un avantage décisif pour l'identification et le suivi d'objectifs stratégiques.

Par ailleurs, l'utilisation des radars spatiaux favorise une couverture géographique étendue avec une grande précision, essentielle pour établir des systèmes d'alerte précoce et réagir rapidement aux situations de crise. Grâce à la capacité de fusionner des données obtenues sous différents angles et à différents moments, ces systèmes offrent une vision quasi instantanée de l'évolution des scènes observées. Cette approche permet aux décideurs militaires de disposer de renseignements fiables et actualisés, renforçant ainsi la résilience et l'efficacité des dispositifs de sécurité nationale face aux défis émergents dans le domaine de la défense.

Bien que les principes physiques mis en jeu par la technologie radar soient complexes, nous allons chercher à comprendre le fonctionnement et les atouts de cette technologie.

Principe physique

Un radar permet de détecter des objets réfléchissant le rayonnement magnétique. Le radar émet un signal fort sous la forme d'une onde électromagnétique d'une certaine fréquence, et les objets (avions, bateaux, drones, véhicules terrestres, hangars, silos et autres véhicules, bâtiments ou objets métalliques) vont réfléchir et renvoyer cette onde électromagnétique. Ainsi le radar, après avoir émis son onde, se place en phase de réception de réflexions qui pourraient arriver. En mesurant le retard entre l'émission et la réception de l'onde, on peut connaître la distance entre le radar et une cible, par une simple formule : $D = \frac{c \cdot \tau}{2}$ (D est la distance [m], c la vitesse de la lumière [m/s], τ le retard entre l'émission et la réception [s]).

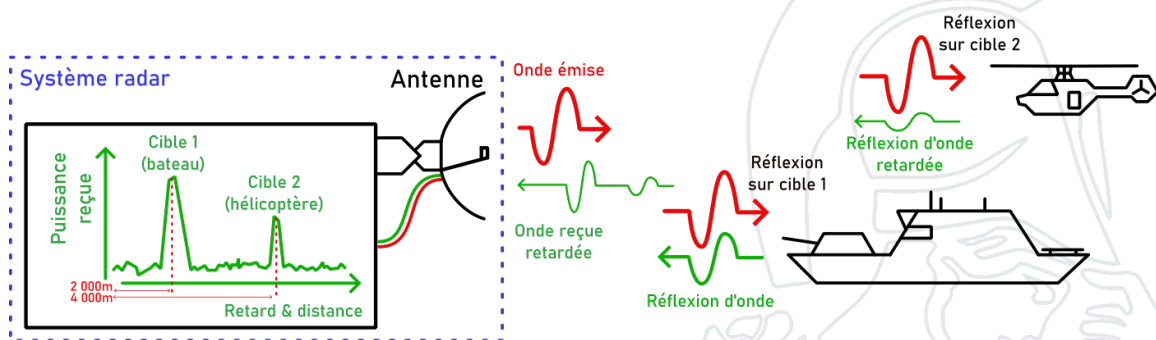


Schéma simplifié du fonctionnement d'un radar

Sur le schéma ci-dessus, à partir d'une antenne qui émet une onde (en rouge), on peut identifier des cibles réfléchissantes (le bateau et l'hélicoptère). Les deux avantages du radar sont sa résilience aux conditions météo comparé à une caméra, et sa capacité à suivre la courbure de la terre pour viser derrière l'horizon terrestre.

Comprendre les contraintes physiques

Pour mieux comprendre comment fonctionne un radar, on peut étudier l'équation du radar. Elle nous permet de calculer la puissance reçue P_R en Watt par une réflexion de cible (et donc, notre capacité à la détecter) :

$$P_r = P_t \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4}$$

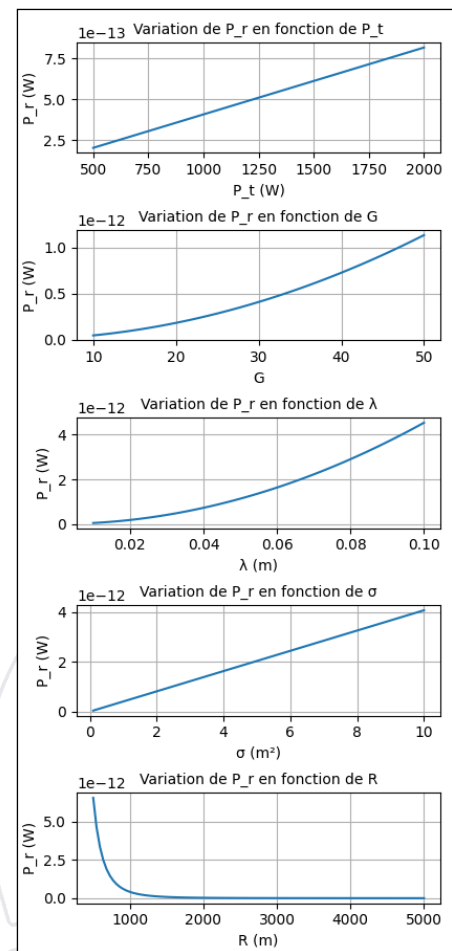
Avec :

- P_t La puissance d'émission en Watt du radar
- G_{TX} Le gain de l'antenne émettrice du radar
- G_{RX} Le gain de l'antenne réceptrice du radar
- λ La longueur d'onde émise ($\lambda = \frac{c}{f}$ avec f la fréquence du radar)
- σ La « Surface Equivalente Radar » (degré de réflexion d'une cible)
- D La distance entre le radar et la cible

L'objectif est de maximiser la puissance reçue par un radar. De ce fait, nous voyons par la forme de l'équation que pour maximiser la puissance reçue P_r , on peut augmenter P_t , G_{RX} , G_{TX} , λ voire σ . On peut aussi diminuer la distance D . Il est intéressant de jouer sur la distance. Si l'on est 2 fois plus proche d'une cible, on reçoit 2^4 soit 16 fois plus de puissance.

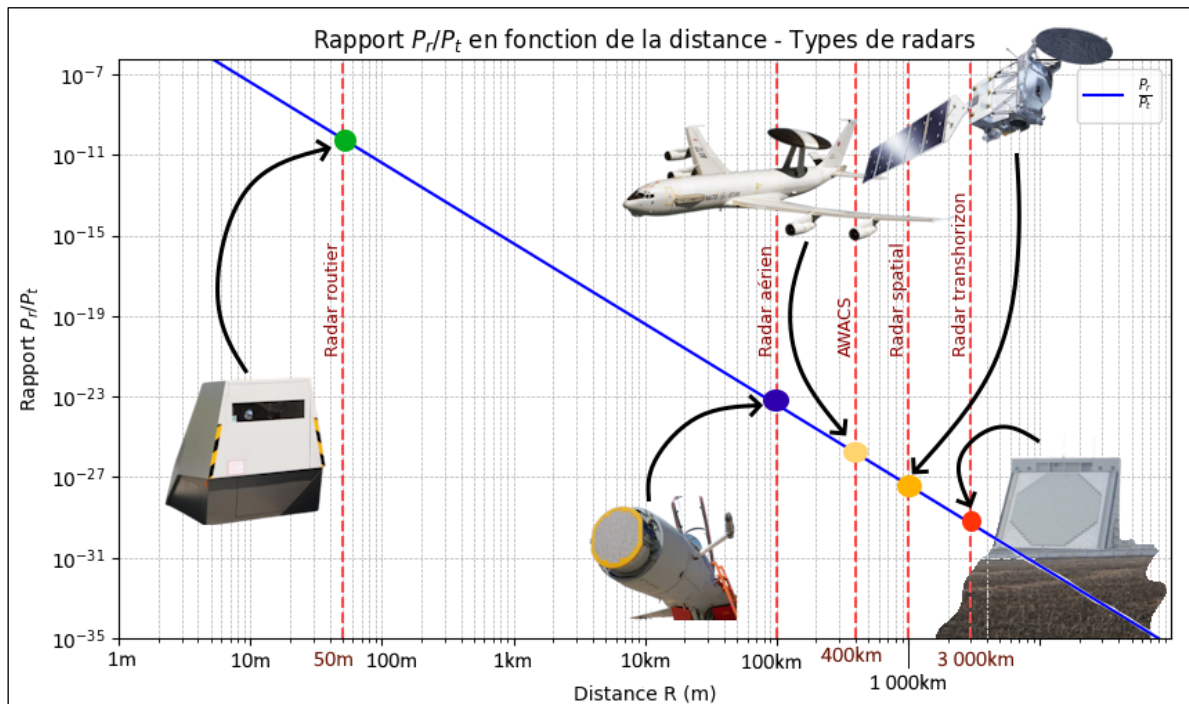
Cet avantage, les ingénieurs soviétiques chargés de la conception du satellite espion Cosmos-954 l'avaient bien compris. La mission de surveillance maritime du satellite était réalisée par un radar, alimenté par un générateur nucléaire à l'uranium. L'objectif ici était de maximiser P_t tout en minimisant D pour avoir le maximum de P_r et donc, détecter des navires et même des sous-marins.

Le satellite étant à une faible altitude de 260 km, il était constamment légèrement freiné par la thermosphère. Le système de maintien en altitude est tombé en panne le 6 janvier



Influence des paramètres de l'équation sur la puissance reçue

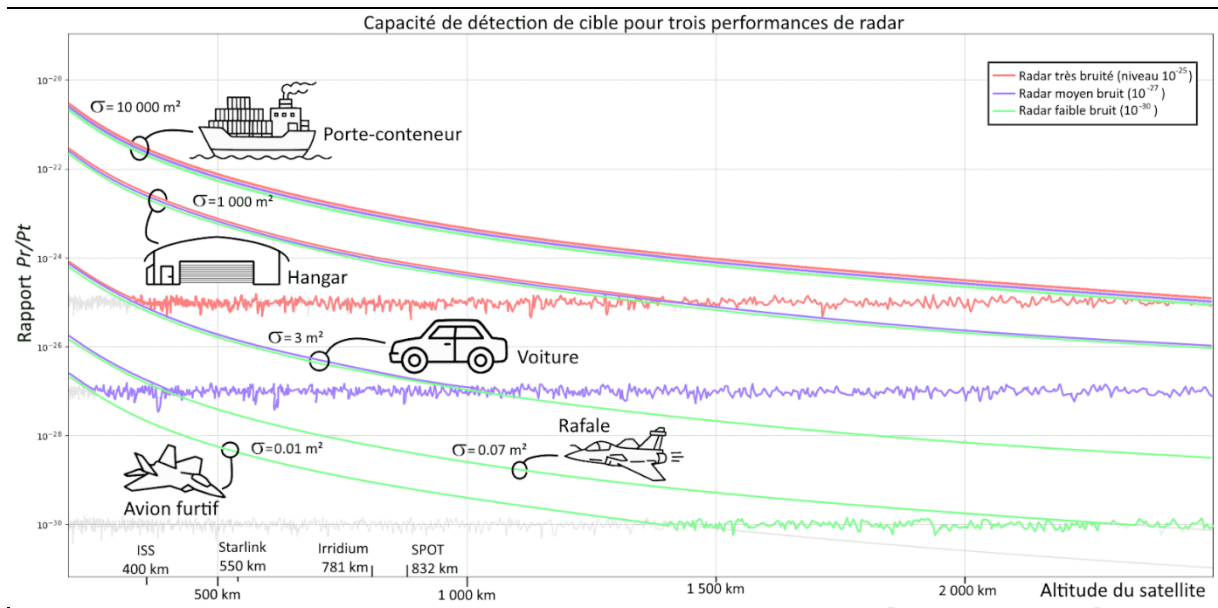
1978. Freiné par la fine couche de l'atmosphère, il retombera au nord du Canada le 24 janvier 1978, dispersant de l'uranium radioactif sur une zone de plus de 200 km de long. C'est le premier accident spatial nucléaire.



Graphique de la puissance reçue en fonction du signal, référencé avec la portée maximum de systèmes radars existants.

Le rapport Signal-à-bruit ou SNR (*Signal to Noise Ratio*)

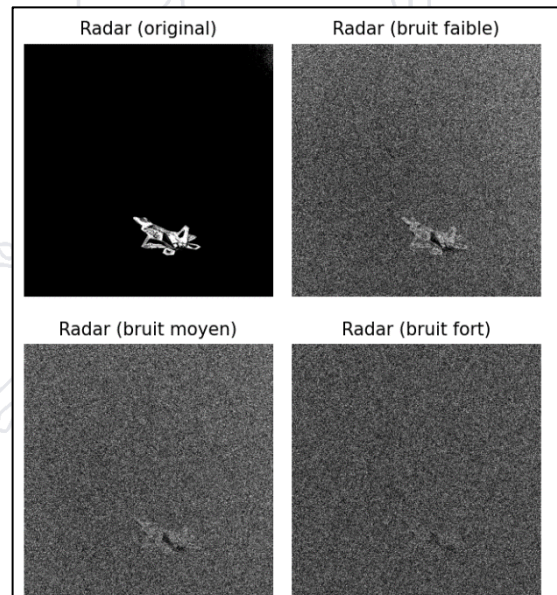
Tout capteur est sujet au bruit électronique. Il est dû au mouvement des électrons dans les métaux empêchant des mesures précises, et il est proportionnel à la température du capteur. Le schéma ci-dessous présente la capacité d'un radar à détecter différentes cibles en fonction de ses performances concernant le rapport signal-à-bruit.



Capacité de détection de cible pour trois performances de radar

Pour tout radar, l'objectif est d'avoir une puissance reçue par une cible supérieure au niveau de bruit du capteur. Sur le graphique ci-dessus, nous avons représenté trois radars dans l'ordre croissant des performances : rouge, violet, vert, avec chacun leurs planchers de bruit. Nous les avons croisés avec différentes cibles, caractérisées par une SER (Surface Equivalente Radar : σ).

Tant que la courbe décroissante ne passe pas en dessous du niveau de bruit de notre radar, on détecte notre cible. Lorsque la courbe décroissante passe en dessous du niveau de bruit, on dit que le signal utile est « noyé » dans le bruit.⁸

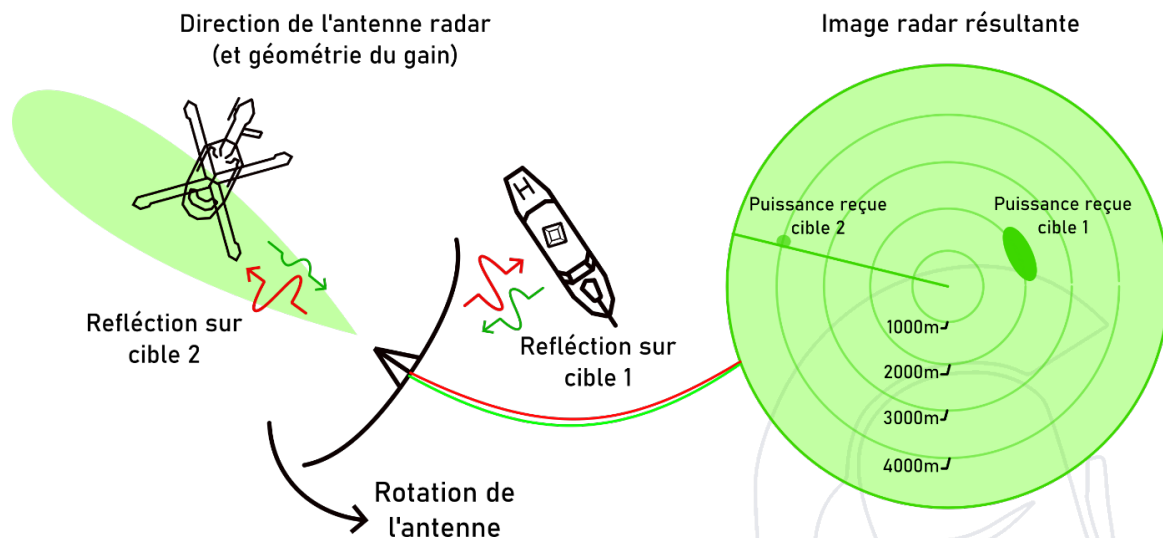


Exemples de détection radar bruitées

⁸ WOLFF, Christian. « Signal-to-noise ratio ». *Radar Tutorial EU* [En ligne], [consulté le 14/04/2025]. Disponible sur : radartutorial.eu

Orienter les cibles

Nous connaissons la distance d'une cible, nous devons également connaître la direction de ces cibles. La méthode la plus connue consiste à faire tourner l'antenne, et à afficher les mesures sur une image circulaire, dite « polaire »⁹.



Principe de la représentation polaire de la détection de cibles

Depuis une vingtaine d'années, les réseaux d'antennes permettant d'orienter électroniquement (en émission et en réception) se développent jusqu'aux applications civiles. Elles permettent des techniques avancées de traitement du signal, des balayages ultra rapides voire multiples sans contraintes mécaniques. Le principe physique est complexe : il fait intervenir des franges d'interférences constructives et destructives. Il peut être simplement visualisé par la figure ci-dessous, représentant les retards des ondes au sein du réseau d'antenne. On peut contrôler ce retard pour orienter le signal électroniquement également (*beamforming*).

⁹ WOLFF, Christian. « Direction-determination ». *Radar Tutorial EU* [En ligne], [consulté le 14/04/2025]. Disponible sur : radartutorial.eu.

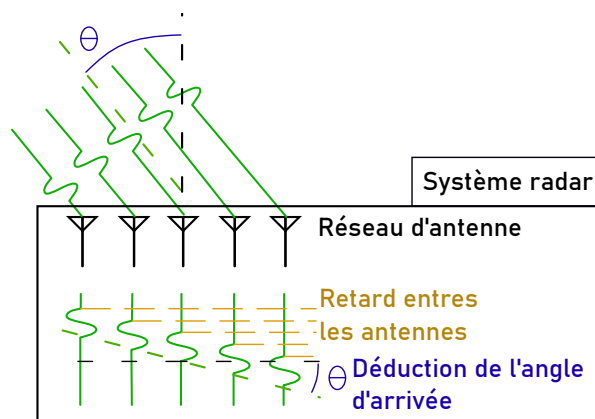
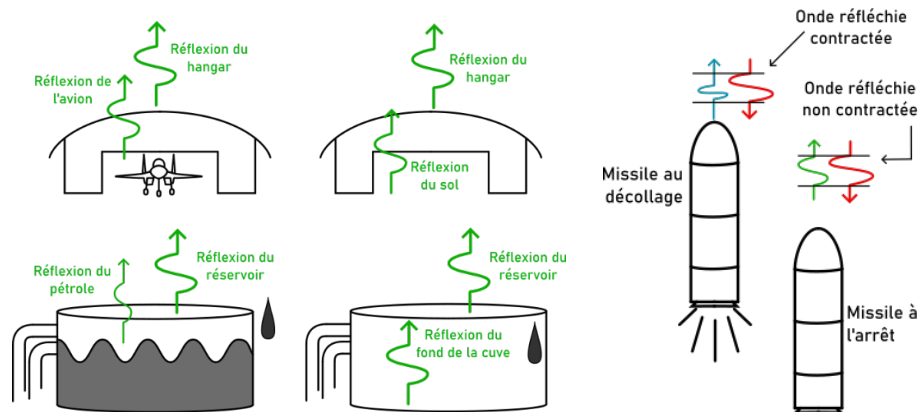


Schéma de principe du *beamforming*

Les grands avantages par rapport à l'optique

Le système radar nous permet de jouer avec les multi-trajets et les réflexions. Comme nous détectons les cibles par leurs distances, il est possible de localiser des retours d'énergie cachés. Une quantité non négligeable du signal émis peut traverser certaines surfaces, comme le bois, le béton fin ou des plaques métalliques fines. Cela est dû aux fréquences radar choisies. Une partie du signal atteint alors l'intérieur du bâtiment et est réfléchi par son contenu. Grâce à cette méthode, il devient possible de voir l'intérieur des bâtiments.

Il est également possible de déduire la vitesse d'une cible par la déformation de l'onde réfléchi. C'est grâce à l'effet Doppler que l'on peut traiter cette information (le même qui déforme le son des ambulances qui se déplacent à hautes vitesses, lorsqu'elles s'approchent de vous puis s'éloignent avec un ton aigu puis grave).



Retours de signaux d'objets cachés / Détermination de vitesse grâce à l'effet Doppler

Ainsi, tout objet possédant une vitesse verticale (montée ou en descente) peut être identifié. Ce traitement Doppler est utilisé pour l'identification et la surveillance de missiles type ICBM (systèmes Early Warning), mais aussi pour la sécurité routière : la vitesse des voitures déforme l'onde. En mesurant cette déformation, on retrouve la vitesse du véhicule.

Les images « SAR »

Dans la partie « Orienter les signaux » nous avons évoqué la possibilité de réaliser des réseaux d'antennes pour diriger le signal en émission et en réception. Il est possible de synthétiser un réseau d'antenne en connaissant la trajectoire de cette dernière. L'avantage du radar à synthèse d'ouverture ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*) est d'augmenter la précision angulaire de l'image radar sans multiplier le nombre d'antennes ou augmenter les dimensions des instruments embarqués. Il nécessite une très bonne localisation et stabilité du satellite porteur, mais permet d'incroyables performances.

Satellite radar SAR

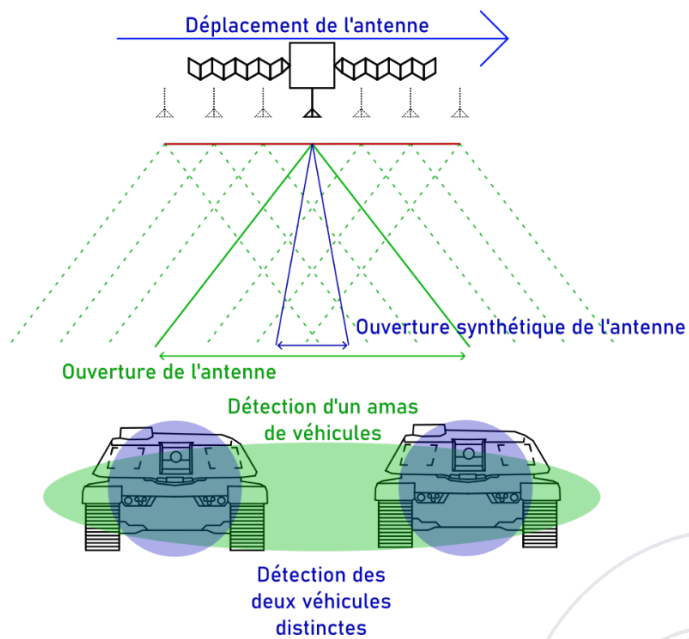


Schéma de principe du radar SAR



Conclusion

A l'heure où l'on constate un regain de tensions à l'échelle internationale, observer en détails n'importe quelle zone de la Terre devient un avantage stratégique indéniable, voire un prérequis. Les deux technologies présentées dans cette publication ont des usages bien différents, mais comme vous l'avez compris, elles répondent à des besoins opérationnels bien particuliers : renseignement, soutien aux opérations, planification...

L'imagerie spatiale optique, hyperspectrale et RADAR sont complémentaires. Utiliser l'ensemble du spectre électro-magnétique permet d'identifier une multitude d'éléments d'intérêt pour les armées : visualisations du terrain, compositions des sols, des eaux et des bâtiments, pénétration des matériaux, compositions chimiques. Ces outils puissants s'appuient sur les avantages donnés par la maîtrise de la mécanique spatiale et des différentes orbites terrestres.

La France, par ses choix politiques, maîtrise les compétences techniques sur ces deux domaines. Cela lui confère un atout majeur pour défendre ses intérêts et ceux de ses alliés dans les crises du XXIème siècle. Rester à la pointe de la technologie spatiale devient primordial pour les grandes puissances. La militarisation de l'espace ainsi que la capacité à neutraliser les instruments spatiaux ennemis sont des sujets majeurs de réflexion, à en voir les investissements réalisés par les différents états concernés.



**LES JEUNES
IHEDN**

publication@jeunes-ihedn.org