



# Les radars

### LA DÉTECTION VIA LES ONDES RADIO



On prétend généralement que ce sont les circonstances de la Seconde Guerre mondiale qui ont conduit à la réalisation du radar, acronyme de **RA**dio **D**étection **A**nd **R**anging (détection et télémétrie radio). En réalité, cette guerre a davantage contribué à l'usage du radar qu'elle ne l'a véritablement produit. Il s'agissait à cette époque de repérer les avions ennemis. Par la suite, les applications du radar ont largement dépassé le domaine militaire. Aujourd'hui, on emploie des radars en météorologie, sur les routes, en astronomie... Fondamentalement, il s'agit d'émettre une onde électromagnétique sous forme d'un étroit faisceau et attendre l'onde retour, ou « écho », consécutivement au renvoi qu'elle subit en rencontrant un obstacle plus ou moins bon conducteur de l'électricité. Les fréquences employées sont très variables : certains radars émettent à quelques mégahertz, tandis que d'autres fonctionnent dans le domaine optique. Dans ce dernier cas, on emploie l'acronyme Lidar : « Li » pour light (lumière en anglais). Le principe du radar est donc très simple. La pratique cependant est plus complexe et, de nos jours, elle met en jeu, souvent, de puissants ordinateurs. En effet, afin de tirer le maximum de profit du signal retour, il est indispensable de l'analyser dans ses moindres détails, car ces derniers révèlent de nombreuses informations relatives à l'obstacle (dimensions, vitesse, composition...). De plus, ce n'est qu'à travers une telle analyse poussée que l'on peut extraire le signal intéressant et éliminer les bruits parasites.

### UN PEU D'HISTOIRE

#### LA NAISSANCE DES RADARS

Comme c'est souvent le cas en histoire, il est difficile de dater précisément l'invention du radar. Cela n'a souvent même pas de sens. Disons que l'idée de détection d'obstacles à l'aide d'ondes électromagnétiques date de 1904. Elle est due à l'Allemand Christian Hülsmeyer qui dépose un brevet pour un appareil qu'il baptise

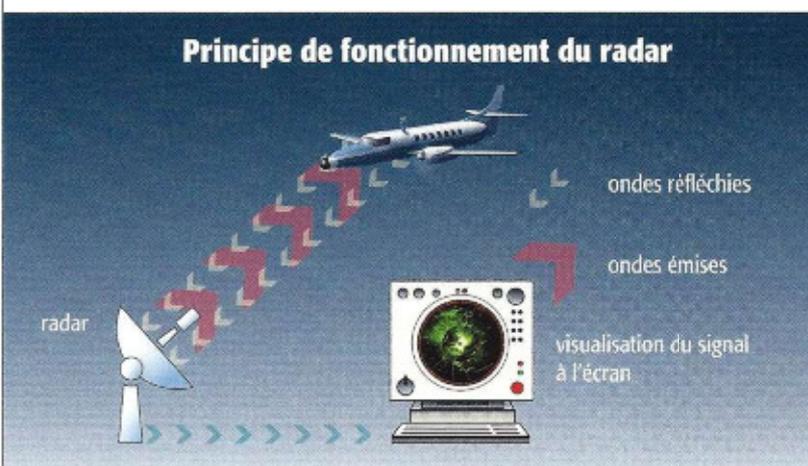
télémbioscope. Son objectif était de repérer des navires à plusieurs kilomètres de distance. La première détection par radar est effectuée en 1922 : un bateau sur le fleuve Potomac aux États-Unis. Mais cette première ne remporte pas un vif succès. Puis, en juin 1930, on détecte pour la première fois, et de manière accidentelle, un avion. Il passait dans un faisceau d'ondes radio de 9 mètres de longueur d'onde (33 MHz). Quelques années s'écoulaient encore avant que les premiers radars opérationnels voient le jour, comme par exemple celui installé en 1934 sur le paquebot Normandie, destiné à repérer les icebergs. À cette époque, aux États-Unis, le Bureau des Recherches Scientifiques étudie sérieusement la possibilité de détection d'obstacles à l'aide d'ondes électromagnétiques. En France et en Angleterre on se penche également sur la question, sentant l'imminence d'un conflit militaire. C'est à ce titre que l'on peut évoquer le rôle joué par la Seconde Guerre mondiale dans l'histoire du radar, lequel a d'ailleurs contribué à la victoire des alliés. La première raison d'être de la détection électromagnétique à cette époque est de pouvoir déclencher l'alerte bien avant l'arrivée de bombardiers ennemis. Il faut donc les détecter à grande distance, à 100 ou 200 kilomètres, laissant environ un quart d'heure avant leur arrivée.

#### UNE UTILISATION MILITAIRE

Vers 1935, les Allemands, les Français, les Anglais, les Américains, possèdent des radars permettant



de détecter des avions à environ 100 km de distance. Le 7 décembre 1941, les Américains détectent par radar les avions japonais, trois heures avant l'attaque de Pearl Harbor, mais personne ne prend la chose au sérieux... En 1945, à la fin de la guerre, les alliés disposent d'une panoplie de radars fonctionnant à des longueurs d'onde situées entre 1 cm et 10 m. Les Allemands, eux, ayant négligé cette technique, pensant en 1940 que leur victoire était assurée, ont accumulé beaucoup de retard dans ce domaine. C'est en partie cela qui a conduit à leur défaite. Ils découvrent par exemple, après la fin de la guerre, l'emploi de leurres radar par les alliés : des paillettes en aluminium lâchées dans le ciel, qui trompaient les radars ennemis, leur



faisant croire la présence d'avions. Signalons que, durant la guerre, l'usage du radar ne se limite pas à l'aviation. On l'emploie également pour détecter, suivre, abattre les bombes volantes V1, mais aussi des navires. C'est de cette manière notamment que le fameux **Bismark** allemand est traqué par deux



croiseurs pendant plusieurs jours, puis coulé en 1941.

#### LES PREMIERS RADARS EMBARQUÉS

Au départ, les radars étaient de gros appareils qu'il n'était pas possible d'embarquer. Cela tenait en partie au fait que l'on ne maîtrisait pas la production d'ondes haute fréquence, c'est-à-dire de courtes longueurs d'onde. Or, les dimensions d'une antenne sont de l'ordre de celle de la longueur d'onde. Comme les fréquences produites étaient situées aux alentours de 100 MHz, les longueurs d'onde étaient de l'ordre du mètre, de même que les antennes. Progressivement, les radars aéroportés apparaissent. Ils équipent notamment les avions anglais. Puis, ce sont les détecteurs de radars qui voient le jour : les premiers sont installés sur les sous-marins allemands, les fameux



**U-Boote**, facilement repérables par radar lorsqu'ils faisaient surface. Un tel détecteur est un simple récepteur qui balaye la gamme de fréquences

dans laquelle se situe, à priori, l'émission radar. Si un signal est capté, c'est que l'appareil est dans un faisceau radar. Cela permettait aux sous-marins de plonger rapidement, souvent même avant que les avions anglais ne les détectent.

#### LE MAGNÉTRON

Un gros progrès est réalisé avec l'invention du « magnétron », un petit appareil qui équipe nos fours à micro-ondes. Grâce au magnétron, il devient possible de produire des ondes courtes de quelques centimètres de longueur d'onde : les antennes se miniaturisent. Au sortir de la guerre, les fondements du radar sont solidement établis. Les progrès réalisés par la suite, encouragés par la guerre froide, sont essentiellement technologiques. Par ailleurs, le radar trouve de nombreuses applications civiles. Un autre aspect relatif aux progrès réalisés concerne l'analyse des signaux et la théorie statistique de la détection : cela relève des mathématiques.

#### QUELQUES GÉNÉRALITÉS

Il existe un grand nombre de radars qui diffèrent dans leur mode de production de l'onde ainsi que par d'autres aspects techniques. Cependant, le plus souvent, un radar émet une succession d'impulsions dont la fréquence est bien déterminée. Typiquement, la durée des impulsions est de 1 microseconde et celle des intervalles de temps qui les séparent de 1 milliseconde, ce qui correspond à l'émission de 1 000 impulsions par seconde. La puissance crête à l'émission peut atteindre plusieurs mégawatts. Mais en raison des périodes de « silence », la puissance moyenne est beaucoup plus faible (quelques kilowatts dans cet

exemple). L'écho reçu peut être aussi faible que  $10^{-10}$  Watts ! La « largeur » du faisceau est de l'ordre de 1 degré. Les antennes radars se présentent généralement comme d'énormes **paraboles** de 10



ou 20 mètres de diamètre, mais une nouvelle génération d'antennes a vu le jour au cours des années 1970. Ce sont les radars dits à « réseau de phase » ou « réseau phasé ». Dans ce cas, l'antenne se présente comme une surface plane, une dalle plate tapissée d'un très grand nombre de petites sources (plusieurs milliers dans certains cas), chacune émettant une onde. Toutes ces ondes interfèrent et leur résultante donne le véritable faisceau radar. En actionnant ces sources élémentaires avec des délais convenables les unes

après les autres, on détermine la direction d'émission du faisceau radar : c'est le balayage électronique. Ainsi, on oriente le faisceau électroniquement plutôt que mécaniquement en tournant une antenne de plusieurs tonnes. Cela constitue un gain de temps non négligeable surtout lorsqu'il faut agir vite, comme par exemple dans les systèmes anti-missile. L'exemple le plus connu de ce genre de dispositif



est le **système Patriot** mis au point par les Américains et utilisé surtout pendant la première guerre du Golfe. Signalons que la technique du

### Applications diverses

1922

Appleton et Barnett utilisent l'écho radar pour mesurer l'altitude de l'ionosphère.

Novembre 1951

Inauguration du premier système radar portuaire d'Europe, à Amsterdam.

1965

Mesure de la période de rotation de Mercure sur elle-même grâce au radiotélescope Arecibo.

Altitude

Les pilotes d'avion utilisent un radar pour connaître leur altitude.

1949

Première campagne d'utilisation du radar en météorologie, dans le cadre d'un projet de prévision des orages.

1976

Apparition du Lidar, version « lumière » du radar.

Le radiotélescope d'Arecibo (Porto Rico)



305 mètres de diamètre

réseau phasé à balayage électronique n'est pas vraiment nouvelle puisqu'elle était mise en œuvre dans certains radars pendant la Seconde Guerre mondiale, notamment par le Mammuth allemand.

### SURFACE ÉQUIVALENT RADAR ET FURTVITÉ

L'obstacle éclairé par le faisceau ne renvoie vers le radar qu'une partie de l'énergie électromagnétique reçue, le reste est émis dans des directions quelconques ou absorbé. La SER ou « surface équivalent radar » traduit l'énergie moyenne rayonnée par l'obstacle vers le radar. Bien sûr, pour être discrète, la cible doit présenter une très faible SER. À titre d'exemples, un chasseur des années 1970 avait une SER de l'ordre de  $5 \text{ m}^2$  ; celle du Rafale français vaut environ  $1 \text{ m}^2$ , tandis que l'avion furtif américain **F-117** possède



une SER de l'ordre de  $0,01 \text{ m}^2$ , voire inférieure. Autrement dit, cet avion est vu par un radar comme un disque de  $5 \text{ cm}$  de rayon. Sachant que les meilleurs radars détectent des SER de  $1 \text{ m}^2$  à  $100 \text{ km}$ , on comprend l'intérêt de réduire la SER. Il existe deux moyens de réduire la SER : absorber l'onde incidente ou la renvoyer dans une direction autre que celle où se trouve le radar. Cela implique à la fois une géométrie et une architecture bien étudiée, ainsi que l'emploi de matériaux absorbants.

### LUTTE CONTRE LA FURTVITÉ

Les premiers radars mettaient en œuvre des ondes métriques. Progressivement, cette gamme a été abandonnée. Cependant, on assiste aujourd'hui à un retour de ce genre de radar, appelé néo-métrique. La raison est la mise au point des techniques de furtivité qui permettent de dissimuler complètement ou partiellement un véhicule au radar. En effet, on s'est rendu compte que les avions dits « furtifs » sont furtifs pour les fréquences traditionnellement employées par les radars modernes, mais qu'ils deviennent repérables aux basses fréquences. D'où un retour vers la gamme métrique. Une autre méthode de lutte contre la furtivité est l'emploi de radars dits bistatiques ou multistatiques qui permettent d'observer une cible sous différents angles. En effet, actuellement la furtivité est obtenue surtout pour certains angles de visé, ceux sous lesquels un avion est généralement vu par un radar.

### TÉLÉMÉTRIE

Il suffit de mesurer le délai qui sépare l'émission de la réception pour pouvoir déterminer la distance de l'obstacle qui a renvoyé l'onde. En effet, comme les ondes électromagnétiques se

propagent à  $300\,000 \text{ km/s}$  dans l'air comme dans le vide, ce délai correspond à un aller-retour, c'est-à-dire au double de la distance émetteur-cible. En raison de la très grande vitesse de propagation, une infime erreur sur la mesure du délai entraîne une très grande erreur sur l'appréciation de la distance :  $0,1$  milliseconde correspond à  $15 \text{ km}$  ! On emploie cette technique par exemple dans le domaine de l'altimétrie (avions, satellites, etc.) ou encore pour mesurer la distance de planètes.



C'est de cette manière par exemple que l'on connaît avec grande précision la distance Terre-Lune, et que l'on sait qu'elle augmente de  $4$  centimètres par an environ. C'est encore le radar qui a permis de mesurer avec précision la distance Terre-Soleil en 1961.

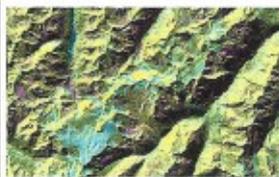
### MESURE DE VITESSE

Pour connaître la vitesse de la cible, on utilise l'effet Doppler, du nom du mathématicien et physicien autrichien Christian Doppler (1803-1853). Il s'agit du décalage en fréquence que subit une onde sonore ou électromagnétique lorsque la source productrice de l'onde et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. S'ils se rapprochent, la fréquence reçue est plus élevée que celle produite ; s'ils s'éloignent, elle est plus faible.

Signaux cependant que le mouvement de la source affecte davantage la fréquence que ne le fait celui de l'obstacle : l'effet Doppler n'est pas symétrique. Quoi qu'il en soit, il suffit de comparer la fréquence de l'onde radar à son retour à celle émise pour connaître le décalage et en déduire la vitesse relative de l'obstacle par rapport à l'émetteur. En particulier, si l'émetteur est immobile, cela donne la vitesse de l'obstacle. Certains radars routiers mettent cependant en œuvre une autre technique permettant de mesurer la vitesse. Le radar émet une impulsion très brève, laquelle est renvoyée par une voiture. Le délai permet de déterminer la distance. Une autre impulsion est alors émise, ce qui permet de déterminer la nouvelle distance. On détermine ainsi comment la distance de l'automobile varie avec le temps, ce qui correspond à sa vitesse. Bien sûr, plus les impulsions sont rapprochées, et mieux on détermine la vitesse instantanée.

### CARTOGRAPHIE ET SAR

Tout le monde a déjà vu les très belles cartes établies par satellite. Tandis que certaines sont de simples photographies, d'autres mettent en œuvre une imagerie radar. La technique qui permet cela est désignée sous le nom de SAR, acronyme de **Synthetic Aperture Radar** (radar à ouverture synthétique) : elle s'appuie sur une exploitation tout à fait



astucieuse de l'effet Doppler. L'exemple suivant pris en acoustique permettra d'en comprendre le fondement. Si une source sonore s'approche de nous de face (dans notre direction) à la vitesse  $V$ , nous observerons un effet Doppler important correspondant à sa vitesse. Le décalage en fréquence observé sera le même pendant toute la durée de l'approche. Si en revanche nous sommes au bord d'une route et nous observons des voitures venant en ligne droite, de loin, s'approcher de nous mais pas dans notre direction (elles ne viennent pas sur nous), alors le décalage en fréquence dû à l'effet Doppler ne sera pas constant : il sera d'autant plus faible que la distance de la voiture sera faible. À la limite, à l'instant où la voiture sera située exactement en face de nous de sorte que la droite qui nous joint à elle soit perpendiculaire à la route, il n'y aura pas d'effet Doppler. En effet, ce qui compte, c'est la projection de la vitesse sur la direction émetteur-récepteur. Un raisonnement analogue permet de montrer que le décalage Doppler observé par un radar embarqué en mouvement est fonction de la projection du vecteur vitesse sur l'axe de visée : il n'est pas tout à fait le même pour les obstacles situés en face que pour ceux situés sur les côtés et varie continuellement avec la direction de visée. Par ailleurs, le décalage Doppler reçu d'un point réflecteur au sol varie au cours du temps en fonction de la position de l'avion (ou du satellite). C'est l'analyse de l'ensemble de ces informations qui permet de dresser une carte avec grande précision.

### QUELQUES APPLICATIONS PAR BANDE DE FRÉQUENCE

La gamme des fréquences employées par les radars s'étend de quelques mégahertz à  $300$  gigahertz, soit des

longueurs d'onde allant de  $100$  mètres à  $1$  millimètre, sans compter les Lidars. Ce spectre est divisé conventionnellement en  $9$  bandes, chacune étant employée par les radars pour des applications spécifiques. Nous allons passer en revue les principales pour chacune de ces  $9$  bandes.

### LES HF (3 MHz À 30 MHz) ET LES VHF (30 MHz À 300 MHz)

Les HF et les VHF étaient employées à la naissance du radar dans les années 1930. Elles ont été rapidement abandonnées, notamment parce qu'à ces fréquences, la largeur du faisceau est assez importante, mais aussi parce qu'il s'agit d'une gamme de fréquences employées par d'autres opérateurs (radio, télévision, etc.). En 1945, on découvre qu'avec les HF il est possible de repérer les pluies d'étoiles filantes. Cela conduit à un regain d'intérêt pour les HF. Malgré les nombreux inconvénients que présentent les HF, elles possèdent une propriété très intéressante : elles sont renvoyées par certaines parties de l'ionosphère (couche ionisée de la haute atmosphère), situées à  $200 \text{ km}$  d'altitude. Grâce à cette propriété, il devient possible de « voir » au-delà de l'horizon, jusqu'à  $3\,000 \text{ km}$  de distance. Les radars HF et VHF sont employés notamment dans la lutte anti-drogue pour repérer de petits avions de transport depuis de très grandes distances, mais aussi en météorologie pour observer les mouvements de masses nuageuses, d'icebergs, etc.

### LES UHF (300 MHz À 1 GHz)

Il s'agit là d'une gamme de fréquence employée par les « avions radars » AWACS, comme les E2 ou E3



américains. En effet, des puissances élevées pour un encombrement relativement faible peuvent être obtenues avec les UHF. Ces avions

radars sont employés pour surveiller de haut le champ de bataille.

### BANDE L (1 GHz À 2 GHz)

On emploie des radars dans la bande L pour le **trafic aérien** dans les



aéroports et pour l'étude des turbulences atmosphériques jusqu'à une distance de  $400 \text{ km}$  environ. Les militaires s'intéressent également à cette bande car elle n'est pas sujette au « black-out » causé par une explosion nucléaire, comme le sont les autres bandes.

### BANDE S (2 GHz À 4 GHz)

### ET C (4 GHz À 8 GHz)

Pour la surveillance du trafic aérien et la météorologie moyenne portée ( $100 \text{ km}$ ), on utilise la bande S, tandis que la bande C est employée pour le repérage et le suivi de précision, notamment sur les radars à réseau phasé.

### BANDE X (8 GHz À 12 GHz)

La bande X est employée par les navires civils et militaires, mais aussi pour suivre de petits objets comme des obus. Les radars SAR fonctionnent généralement dans la bande X.

### BANDE K (12 GHz À 40 GHz)

On emploie la bande K pour la surveillance courte distance dans les aéroports, car il est difficile d'obtenir de hautes puissances et une longue portée dans cette gamme. La plupart des radars de la police fonctionnent également dans la bande K.

### BANDE MILLIMÉTRIQUES

### (40 GHz À 300 GHz)

La portée des ondes millimétriques ne dépassant pas quelques kilomètres dans l'atmosphère, leur emploi est très limité : parfois pour la surveillance du trafic aérien à courte portée et dans certains missiles autoguidés dont la tête loge un radar, comme le missile de croisière français Apache.

## L'effet Doppler

### Ambulance immobile



Les ondes sonores sont parfaitement concentriques. La fréquence perçue est la même, que l'on se trouve à droite ou à gauche de la source.

### Ambulance en mouvement



Les ondes sonores ne sont plus centrées sur le même point. Le son perçu a une fréquence plus élevée si la source s'approche et une fréquence plus basse si elle s'éloigne.