

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES RADARS

### 1 INTRODUCTION

Le mot *RADAR* provient de l'acronyme anglais *Radio Détection And Ranging*, adopté par la marine américaine en 1940, que l'on peut traduire par 'détection et estimation de la distance par ondes radio', cet acronyme d'origine américaine a remplacé le sigle anglais précédemment utilisé : *RDF (Radio Direction Finding)*, mais son histoire débute bien des années auparavant. La première trace généralement retenue dans la genèse du radar remonte à 1886, avec les expériences sur les ondes électromagnétiques du physicien Heinrich Hertz. Les anglais ont sans doute été les plus grands contributeurs au développement du radar.

### 2 Description du radar

Le radar fait usage de l'écho produit par un obstacle situé sur la trajectoire d'une onde électromagnétique. Dans la majorité des cas, l'émetteur et le récepteur sont connectés à une antenne commune: c'est cette situation qui est considérée ici. Le temps qu'il faut à une onde électromagnétique pour aller de l'émetteur à l'obstacle, puis de l'obstacle au récepteur est mesuré et permet de calculer la distance  $R$ .

La variation de fréquence du signal sert à déterminer la vitesse relative de l'obstacle par rapport à la source (effet Doppler). La direction dans laquelle se trouve l'obstacle est obtenue en pointant une antenne à faisceau étroit dans la direction donnant le plus grand signal réfléchi. Le schéma de principe d'un radar est donné à la figure (I.1), dans laquelle sont représentés symboliquement tous les termes qui le caractérisent.

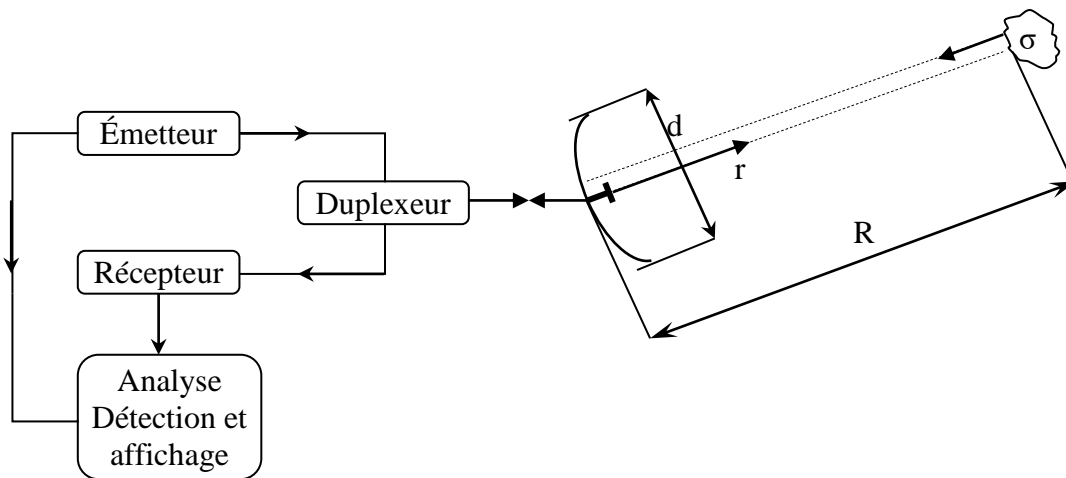


Figure Présentation schématique d'un radar.

### 3 Equation des radars

L'émetteur fournit une puissance  $P_f$  à l'antenne, qui la rayonne dans l'espace en la concentrant dans une ou plusieurs directions privilégiées, effet qui est représenté par le gain de l'antenne  $G$ . La densité de puissance décroît proportionnellement à  $1/4\pi R^2$ , où  $R$  est la distance à l'antenne. Une partie du signal atteint la cible, qui la réfléchit partiellement dans la direction de l'antenne. La cible est représentée par sa surface réfléchissante effective  $\sigma$ . La densité de puissance réfléchi décroît à son tour inversement au carré de la distance. L'antenne capte une partie du signal réfléchi. Elle est représentée par sa surface de captation  $A_e$ , elle-même liée au gain par le rapport  $A_e = G\lambda^2 / 4\pi$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde.

Le rapport entre la puissance reçue  $P_r$  et la puissance  $P_f$  fournie à l'antenne est donné par

l'équation des radars:

$$\frac{P_r}{P_f} = G \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \sigma \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \frac{G\lambda^2}{4\pi} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

La puissance reçue est fournie au récepteur, également connecté à l'antenne. On néglige l'affaiblissement produit par les pertes atmosphériques et on suppose que l'obstacle est situé hors du champ proche de l'antenne.

$$R > 2d^2/\lambda$$

Où  $d$  est la plus grande dimension de l'antenne.

#### 4 Surface réfléchissante effective $\sigma$ (SER, ou RCS, Radar Cross Section)

Un obstacle est caractérisé par sa *surface réfléchissante effective*  $\sigma$ , définie comme étant le quotient de la puissance réfléchie vers le radar par la densité de puissance incidente.

Ces constatations restent valables pour des cibles ayant d'autres formes. Les valeurs limites présentées pour plusieurs géométries au tableau I.1, peuvent être employées en première approximation pour des objets grands par rapport à la longueur d'onde.

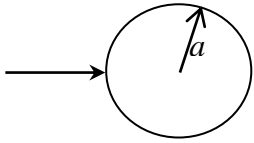
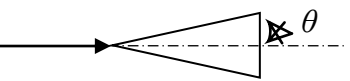
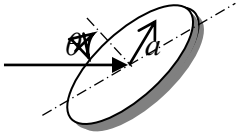
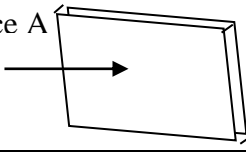
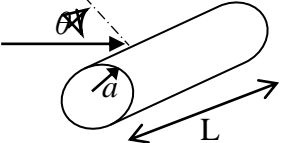
Cible		Surface réfléchissante effective $\sigma$ (limite optique)
Sphère		$\pi a^2$
Cône (Incidence axiale)		$\frac{\lambda^2 \tan^2 \theta}{4\pi}$
Disque		$\pi a^2 \cot \theta \sin^2 \left( \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)$
Surface plane de grande dimension (incidence normale)	Surface A 	$\frac{4\pi A^2}{\lambda^2}$
Cylindre circulaire		$\frac{a\lambda}{2\pi} \frac{\cos \theta \sin^2 \left( \frac{2\pi L}{\lambda} \sin \theta \right)}{\sin^2 \theta}$

Tableau I.1 Valeur approchée de la surface réfléchissante effective d'une cible métallique grande par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$

#### 5 Paramètres de Radar

Il ressort de ce qui précède que le développement d'un radar pose un problème de choix des paramètres. Il faut en effet tenir compte de :

- 1- la puissance  $P_f$  fournie par le générateur (W);
- 2- le gain de l'antenne G;
- 3- la fréquence  $f$ (GHZ) ou la longueur d'onde  $\lambda$ (m);
- 4- la portée  $R_{max}$  (m), qui est la distance maximale de détection;
- 5- la surface réfléchissante effective de la cible  $\sigma$  ( $m^2$ );

- 6- le rapport signal sur bruit ( $P_r/N$ ) minimum acceptable à l'entrée du récepteur, grandeur spécifiée par le système d'analyse du signal;
- 7- la bande passante du récepteur B (Hz);
- 8- la température de bruit globale ramenée à l'entrée du récepteur ( $T_a + T_r$ ) en Kelvin.

Les trois premières grandeurs dépendent de l'émetteur, les trois dernières dépendent du récepteur. La portée et la surface réfléchissante effective définissent la cible à observer.

## 6 Mesure de distance

Les radars les plus couramment employés pour la mesure de distance font usage de brèves impulsions de durée  $\tau$  de signal hyperfréquence qui sont émises avec une fréquence de répétition  $f_r$ . Cette méthode permet d'obtenir un signal hyperfréquences de haute puissance en utilisant une puissance moyenne.

L'onde émise parcourt la distance R qui sépare l'émetteur de l'obstacle, puis revient vers le radar après un temps  $t_{ar}$ . Comme il s'agit d'une onde électromagnétique se déplaçant à la vitesse de la lumière  $C_0$ , on trouve la distance R par la relation :

$$R = \frac{C_0 t_{ar}}{2} \quad (m)$$

## 7 Composantes d'un système radar

Un radar est formé de différentes composantes :

**L'émetteur** : qui génère l'onde radio.

### Le duplexeur

Un commutateur électronique, dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission ou le signal de retour depuis l'antenne vers le récepteur lors de la réception quand on utilise un radar monostatique. Il permet donc d'utiliser la même antenne pour les deux fonctions. Il est primordial qu'il soit bien synchronisé, puisque la puissance du signal émis est de l'ordre du mégawatt ce qui est trop important pour le récepteur qui, lui, traite des signaux d'une puissance de l'ordre de quelques nano-watts. Au cas où l'impulsion émise serait dirigée vers le récepteur, celui-ci serait instantanément détruit.

### L'antenne Radar

Un conducteur parcouru par un courant électrique alternatif produit un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace environnant. Ainsi, un ensemble de conducteurs élémentaires, traversé par des courants variables puissants, forme une antenne radio éditrice. Selon l'alignement de ses conducteurs élémentaires, une antenne peut être plus ou moins directive. L'antenne radar exploite les propriétés des ouvertures planes rectangulaires et diffuse l'onde électromagnétique vers la cible avec le minimum de perte. Sa vitesse de déplacement, rotation et/ou balancement, ainsi que sa position, en élévation comme en azimut, sont asservies, soit mécaniquement, mais parfois aussi électroniquement.

### Antenne radar primaire

Un radar primaire est équipé par une antenne parabolique qui émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés. Contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchi de son propre signal, et voici quelques données techniques de cette antenne:

- Fréquence de travail : 2700 à 2900 MHz (bande S)
- Polarisation : linéaire (horizontale) ou circulaire délectable manuellement
- Poids (support et réflecteur) : 860Kg
- Dimension : longueur = 550 cm, hauteur = 315 cm
- Gain : 32 dB



Figure: Antenne radar primaire celle en bas ([www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu))

### **Le récepteur**

Qui reçoit le signal incident (cible - antenne - guide d'ondes - duplexeur), le fait émerger des bruits radios parasites, l'amplifie, le traite.

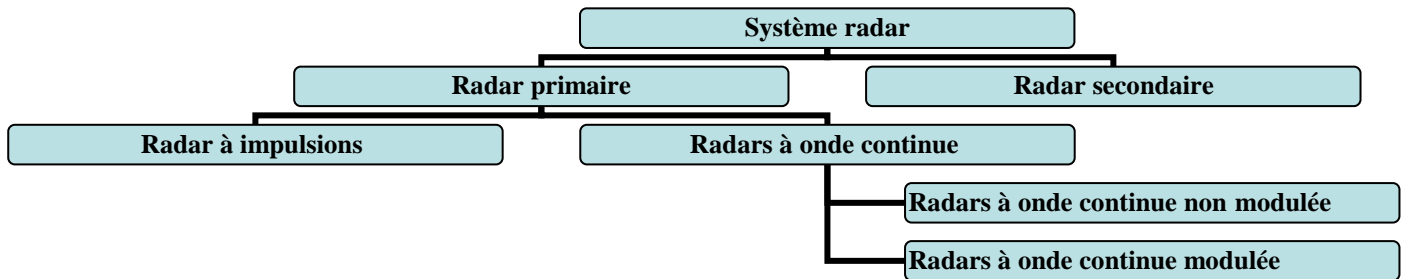
### **Un étage de traitement de signal**

Permettant de traiter le signal brut afin d'en extraire des données utiles à l'opérateur (détection, suivi et identification de cible; extraction de paramètres météorologiques, océanographiques, etc.). Le tout est contrôlé par le système électronique du radar, programmé selon un logiciel de sondage. Les données obtenues sont alors affichées aux utilisateurs.

## CHAPITRE II : CLASSIFICATION DES SYSTEMES RADARS 1

### La classification selon la technologie

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les équipements radars utilisent des qualités et des **technologies** différentes. Ceci se traduit par une première classification des systèmes radars:



### 1 Radar primaire (ou imageurs)

Un radar primaire émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés. Contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchi de son propre signal. Les radars primaires peuvent être de type deux dimensions (**2D**) donnant des mesures de distance et d'azimut ou trois dimensions (**3D**), une mesure complémentaire en angle de site (angle d'élévation dans le plan vertical) est alors disponible.

Pour les radars 2D, l'absence de toute mesure d'angle de site ne permet pas de discrimination en altitude. Ainsi, un avion comme un écho au sol ou un obstacle au sol dans le même azimut et à la même distance seront vus sans distinction. Sa fréquence varie entre 2.7 GHz et 3 GHz.

On distingue deux types du radar primaire :

#### 1.1 Radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance, chaque impulsion est suivie d'un temps de silence plus long que l'impulsion elle-même, temps durant lequel les échos de cette impulsion peuvent être reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. Direction, distance et parfois, si cela est nécessaire, hauteur ou altitude de la cible, peuvent être déterminées à partir des mesures de la position de l'antenne et du temps de propagation de l'impulsion émise.

#### 1.2 Radars à onde continue

Les radars à onde continue génèrent un signal hyperfréquence continu. Le signal réfléchi est reçu et traité, mais le récepteur (qui dispose de sa propre antenne) n'est pas tenu d'être au même emplacement que l'émetteur. Tout émetteur de station radio civile peut être simultanément utilisé comme un émetteur radar, pour peu qu'un récepteur relié à distance puisse comparer les temps de propagation du signal direct et du signal réfléchi. Des essais ont montré que la localisation d'un avion était possible par la comparaison et le traitement des signaux provenant de trois différentes stations émettrices de télévision.

##### 1.2.1 Radars à onde continue non modulée

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue ne permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse sur les routes (cinémomètres radars).

##### 1.2.2 Radars à onde continue modulée

Le signal émis est constant en amplitude mais modulé en fréquence. Cette modulation rend à

nouveau possible le principe de la mesure du temps de propagation. Un autre avantage non négligeable de ce type d'équipement est que, la réception n'étant jamais interrompue, les mesures s'effectuent en permanence. Ces radars sont utilisés lorsque les distances à mesurer ne sont pas trop grandes et qu'il est nécessaire d'effectuer des mesures ininterrompues (par exemple une mesure d'altitude pour un avion ou un profil de vents par un radar météorologique).

Un principe similaire est utilisé par des radars à impulsions qui génèrent des impulsions trop longues pour bénéficier d'une bonne résolution en distance. Ces équipements modulent souvent le signal contenu dans l'impulsion afin d'améliorer leur résolution en distance. On parle alors de compression d'impulsion.

### 1.3 Principe de fonctionnement du radar primaire

Le schéma ci-dessous illustre le principe de fonctionnement du radar primaire. L'antenne du radar illumine la cible avec des micro ondes, qui sont alors réfléchies puis interceptées grâce à un récepteur. Le signal électrique recueilli par l'antenne est appelé „écho” ou „retour”. Le signal transmis par le radar est généré par un émetteur puissant, l'écho réfléchi par la cible est capté par un récepteur

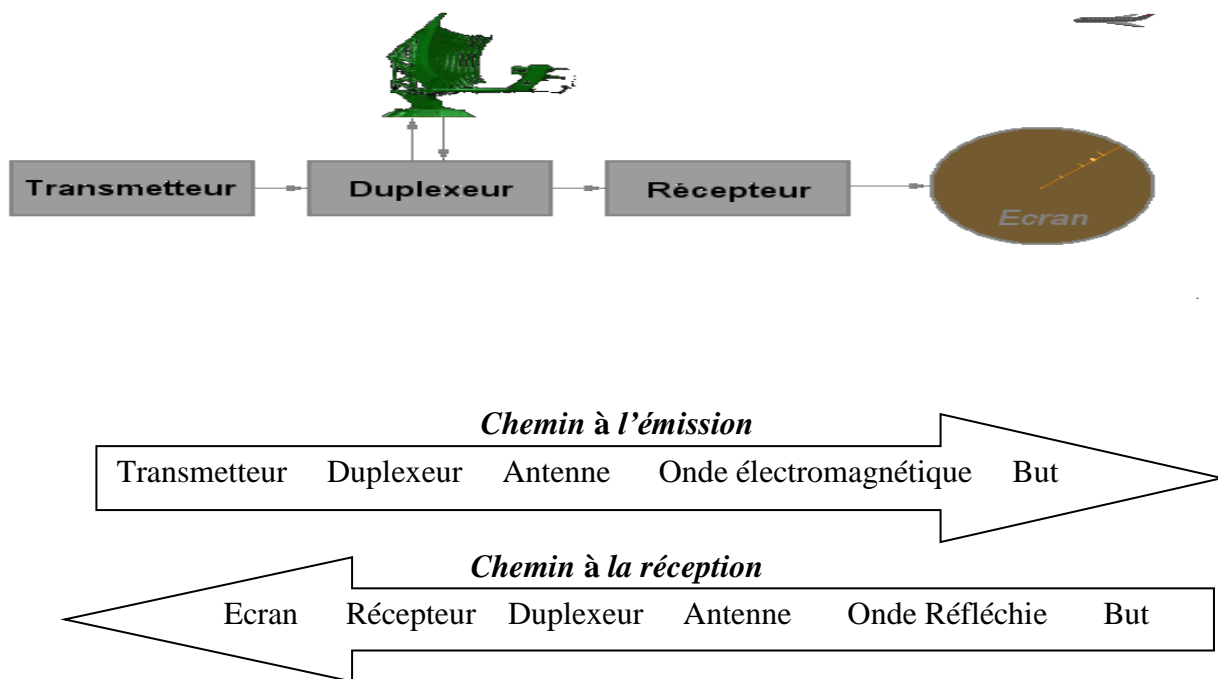


Figure 1: Principe de fonctionnement du radar primaire

### 1.4 Comparaison entre radars à impulsions et radars à onde continue :

Paramètres	Radar à impulsion	Radar à onde continue
Type de signal	Modulée	modulée et non modulée
Antenne	Duplexeur	antennes séparées
Puissance à réception	Elevée	Faible
Domaine d'application	Plusieurs	Moins

## 2 Radar secondaire (ou non imageurs)

Avec ces radars, l'avion doit être équipé d'un transpondeur (transmetteur répondeur) qui répond à l'interrogation du radar en générant un signal codé. Cette réponse peut contenir beaucoup plus d'informations que celles qu'un radar primaire peut collecter (par exemple l'altitude, un code d'identification, ou encore un rapport de problème à bord comme une panne totale des radiocommunications).

## 3 Comparaison entre radar secondaire et primaire

Ces deux systèmes ont les avantages et les inconvénients des principes de fonctionnement qu'ils utilisent. Grâce au radar primaire, on obtiendra des informations fiables de direction, d'hauteur et de distance de la cible, mais le radar secondaire pourra apporter des informations supplémentaires telles son identification ou encore son altitude.

Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique). En effet, la puissance émise est un paramètre de l'équation du radar qui doit tenir compte du trajet de l'onde aller et retour dans le cas du radar primaire, mais uniquement d'un 'aller simple' dans le cas du radar secondaire.

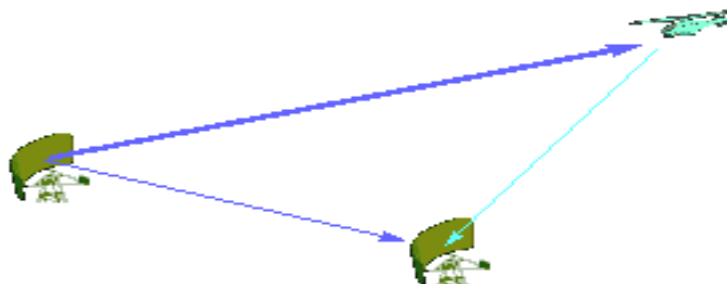
## 4 Radar Doppler

Un **radar Doppler** est un radar qui utilise l'effet Doppler-Fizeau de l'écho réfléchi par une cible pour mesurer sa vitesse radiale. Le signal micro-onde — émis par l'antenne directionnelle du radar — est réfléchi par la cible et comparé en fréquence avec le signal original aller et retour. Il permet ainsi une mesure directe et extrêmement précise de la composante vitesse de la cible dans l'axe du faisceau. Les radars Doppler sont utilisés pour la défense aérienne, pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance des satellites, pour les contrôles de vitesse sur route, en radiologie et dans les réseaux d'assainissement.

Les radars météorologiques récents calculent les vitesses des précipitations par la technique dite « Doppler pulsé », le système de traitement de données est un peu différent. Aux États-Unis, le *National Weather Service* a tant utilisé le terme de « radar Doppler » pour décrire l'amélioration de son réseau NEXRAD que, dans l'esprit du public, ce nom a fini à tort par être synonyme de radar météorologique.

## 5 Radars bistatiques

Un radar bistatique se compose de deux installations considérablement éloignées l'une de l'autre. L'un des sites abrite les équipements consacrés à l'émission, l'autre est consacré à la réception (un tel radar utilise donc également deux antennes, une sur chaque site).



**Figure 2: Deux radars coopérant pour former un radar bistatique: le premier émet et le second écoute les échos des cibles.**

## 6 Radar imageur et Radar non imageur

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet (ou de la zone) observé. Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la terre, les autres planètes, les astéroïdes et les autres objets célestes. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles.

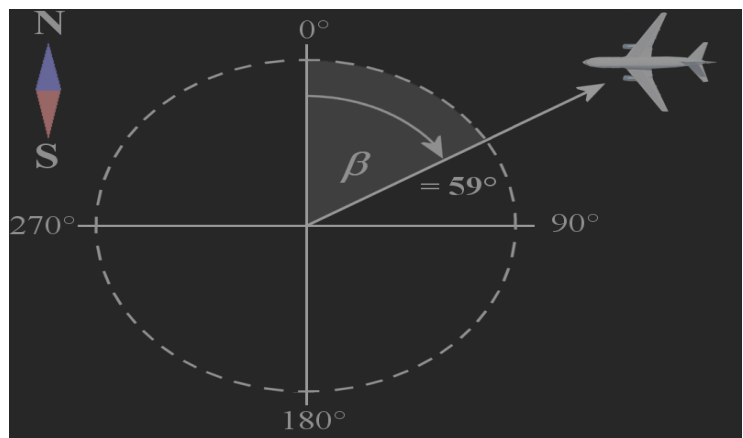
Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars (les petits, sur le bord de la route...) et les radioaltimètres. Ce type de radar est également appelé diffusomètre puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé. Les applications des radars secondaires non imageurs sont par exemple les dispositifs d'immobilisation antivols installés sur certains véhicules privés récents

## 7 Radar multistatique

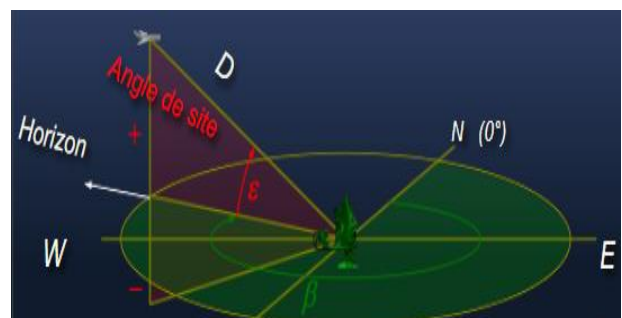
Un système radar multistatique comporte au moins trois composants — par exemple, un récepteur et deux émetteurs, ou deux récepteurs et un émetteur, ou encore plusieurs émetteurs et plusieurs récepteurs. C'est, en fait, une généralisation du radar bistatique avec un ou plusieurs récepteurs traitant les informations de un ou plusieurs émetteurs situés sur des positions différentes.

## Notes

**L'azimut d'une cible détectée par un radar** est l'angle entre la direction du nord vrai et celle de la ligne directe antenne-cible. Cet angle se mesure dans le plan horizontal, dans le sens des aiguilles d'une montre, et à partir du nord vrai.



**L'Angle de site (ou l'angle d'élévation)** est l'angle que forme, avec sa projection sur le plan horizontal, l'axe "antenne radar - cible", mesuré dans le plan vertical. ( $\epsilon$ ) désigne l'angle de site (ou d'élévation). L'angle de site est positif lorsqu'il est au-dessus de l'horizon (site  $0^\circ$ ), et négatif en dessous.





## CHAPITRE III : CLASSIFICATION DES SYSTEMES RADARS 2

### (Domaines d'applications)

#### La classification selon l'usage

Les radars peuvent se classer en différents types selon l'usage auquel ils sont destinés. Cette section donnera les caractéristiques générales de plusieurs radars en usage courants:

#### a-Applications militaires

L'armée utilise encore beaucoup le radar pour détecter les avions, les missiles, les obus, les navires et les satellites. De plus, le radar sert à guider les armes modernes (smart weapons) et à distinguer les cibles.

#### Par exemple :

##### Radar de défense aérienne

Les radars de défense aérienne détectent et suivent les aéronefs ou missiles représentant un danger militaire. Leur portée peut dépasser 300 milles (500 km) sur 360 degrés autour du radar.

Figure: Radar TAFLIR de la force aérienne suisse

##### Radar de contre-batterie

Un radar de contre-batterie sert à déterminer le point de départ d'un tir d'artillerie adverse (canons, mortiers ou même lance-roquettes) par calcul de la trajectoire des projectiles afin d'y riposter le plus vite possible. La position supposée de l'artillerie ennemie est alors affichée sur un écran de situation tactique, en temps réel, dans le poste de commandement qui peut ainsi ajuster le tir de contre-batterie.



Figure: COBRA

#### Téleguidage

Un radar de guidage est généralement intégré dans les systèmes de téleguidage des missiles. Ces derniers utilisent les informations pour:

Les missiles peuvent être guidés par un faisceau radar ami jusqu'à la cible;

Les missiles autoguidés vont détecter et suivre leur cible grâce à l'énergie radioélectrique qu'elle réfléchit. Cela peut être fait grâce à un système radar complet à bord du missile ou par un récepteur radar dans le missile qui capte l'illumination produite par un radar ami sur la cible;  
Les missiles à détection passive se dirigent grâce à l'énergie émise par la cible (ex. un radar ennemi).



Figure: Rapier

### **Radar de champ de bataille**

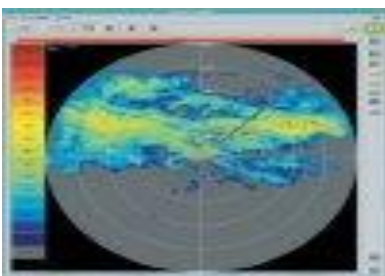
L'équipement radar de l'armée a généralement une portée plus courte et est hautement spécialisé. Sur les navires de la marine, le nombre d'antennes radar spécialisées sont de plus en plus remplacé par un radar multifonctions.



Figure: le radar multifonction « Variant » de la Marine

### **b-Radar météorologique**

Le radar atmosphérique est utilisé principalement dans deux champs d'application en météorologie : La mesure dans l'atmosphère de diverses quantités physiques utiles pour alimenter les modèles de prévision météorologique (vitesse de l'air, indice de réfraction). La prévision détaillée à court terme de phénomènes météorologiques locaux (visibilité, vent, pluie, grêle, tornade, foudre, etc.) et leur évolution sur une dizaine de minutes ou sur quelques heures. Il est à noter que la portée du radar est de 240 kilomètres.



### **c-Navigation**

Un radar à bord d'un avion est utile pour connaître son altitude, sa vitesse et sa position par rapport au sol. Il peut également détecter les zones climatiques dangereuses. Sur un bateau, le radar contribue à éviter les collisions avec d'autres navires dans des conditions de visibilité réduite.

Par exemple :



#### **d-Contrôle aérien**

Tout aéroport (aéroport civil et militaire) possède un réseau radar à proximité afin d'aider au contrôle du trafic aérien. Ce réseau peut être utilisé pour détecter les avions autour de l'aéroport ou pour connaître les variations climatiques influençant le vol des avions.

Par exemple

#### **Radar « en route »**

Les radars « en route » opèrent en général sur la bande L. Ils montrent au contrôleur aérien la position des avions dans une région allant jusqu'à 450 km du radar



#### **Radar de veille aérienne**

Les radars de veille aérienne détectent et déterminent la position, la vitesse et la trajectoire des cibles aériennes dans une zone relativement grande (généralement 500 km ou plus sur 360 degrés). On les divise en deux catégories selon les coordonnées qu'ils notent.

2D pour ceux qui donnent la distance et l'azimut des cibles ;  
3D pour ceux qui ajoutent la hauteur.



Figure: AN/FPS 117 de Lockheed Martins

### **Radar d'approche de précision**

Radar primaire utilisé pour déterminer les écarts latéraux et verticaux de la position d'un aéronef au cours de l'approche finale par rapport à la trajectoire d'approche nominale, ainsi que la distance de cet aéronef au point d'atterrissage. Ils permettent au pilote d'atterrir même avec une visibilité nulle. Les échanges de données entre le radar et l'avion se font de manière verbale avec le pilote ou par signal pulsé pour un pilote automatique.



### **e-Radar de contrôle routier**

Les radars de contrôle routier sont une application spécialisée des radars à onde continue. La variation de la fréquence entre le signal émis et celui retourné (effet Doppler-Fizeau) permet de calculer la vitesse des véhicules sur la route. Ils opèrent en général dans la bande K.

**Par exemple**



Figure: Radar de contrôle routier « Traffipax Speedophot »

## f-Applications spatiales

Plusieurs satellites utilisent le radar pour l'étude de la Terre. On étudie ainsi principalement la météorologie et l'océanographie. Par exemple, on peut suivre par radar les mouvements des icebergs et transmettre ces informations aux navires.

Il ya d'autres applications du radar :

### ✓ Radar de régulation de distance

L'image montre le capteur radar Distronic placé sur la calandre d'une Mercedes-Benz SL-Class roadster. Il fait parti d'un système radar qui sonde à l'avant de l'automobile, jusqu'à 150 mètres, pour détecter les obstacles. Le système de régulation de vitesse avertira le conducteur s'il s'approche d'un véhicule plus lent et pourra même appliquer les freins en dernier ressort.



### ✓ Radar à pénétration de sol

Un radar à pénétration de sol est un appareil géophysique pour étudier la composition et la structure des sols. En général, on utilise la bande des micro-ondes et des ondes radio (VHF/UHF). On peut sonder ainsi une variété de terrains, incluant les calottes glaciaires et les étendues d'eau



Figure: Un radar à pénétration de sol en action

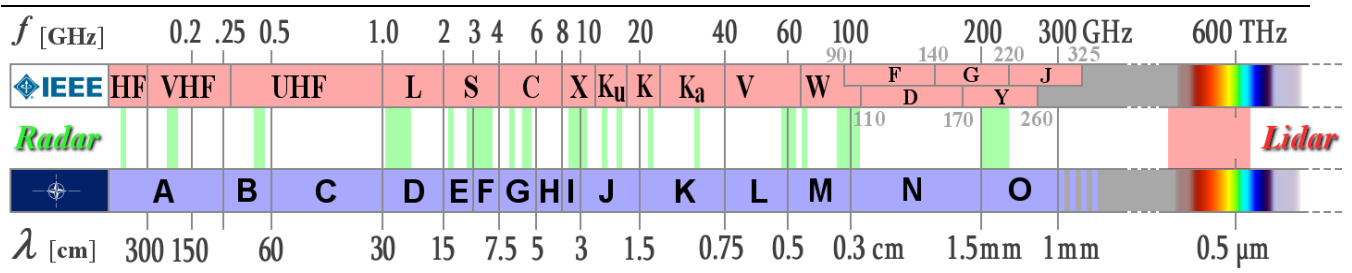
### ✓ Test de matériau

Des radars spécialisés sont utilisés pour pénétrer les objets manufacturés afin de détecter toute déféctuosité, sans endommager le matériau.

## Ondes et bandes de fréquences

Le spectre des ondes électromagnétiques s'étend jusqu'à des fréquences de l'ordre de  $10^{24}$  Hz. Cette bande de fréquence très large est divisée en „sous bandes” afin de prendre en compte les différentes propriétés physiques des ondes qui la composent.

### Techniques radars



Fréquence	IEEE	Types de radars
3-30 MHz	HF	Radars transhorizon, Radars spécifiques (contre avions furtifs)
30-300 MHz	VHF	
0.3-1 GHz	UHF	Radars longue portée : suivi des satellites
1-2 GHz	L	Radars longue portée : suivi du trafic aérien
2-4 GHz	S	Trafic aérien, côtier et météo
4-8 GHz	C	Surveillance aérienne, conduite de tir
8-12 GHz	X	Radars aéroportés, conduites de tir, radar d'atterrissage
12-18 GHz	Ku	
18-27 GHz	K	
27-40 GHz	Ka	
40-75 GHz	V	Auto-Directeurs de missiles
75-110 GHz	W	

**Tableau III-1** : Principales gammes de fréquences porteuses pour applications radar