



UNIVERSITÉ DES  
**MASCAREIGNES**

SAVOIR, C'EST POUVOIR



Université  
de Limoges

## *Génie Electrique et Informatique industrielle 1*



---

# ***LE CAPTEUR: RADAR***

---

Nom de l'auteur: **RAZAFINDRAINIBE Fitahina**

Destinataire du rapport: **Mr Eric Henriette**

Date: 09/11/2024



# Remerciement

D'abord, je tiens à remercier Dieu pour nous avoir guidés et donné de la force avec de la santé pour bien mener ce rapport. Ensuite je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique de l'université des Mascareignes et les intervenants professionnels responsables de la formation en Génie Électrique et Informatique Industrielle, de nous avoir déjà donné des initiations concernant notre cours pour ce semestre. Je remercie également Mr. Eric Henriette pour l'aide et les conseils concernant les missions évoquées dans ce rapport.

Je tiens aussi à remercier tous les étudiants et camarades de classe de Mascareignes pour nos intégrations au sein de l'université

# Résumé

Le rapport est effectué pour approfondir notre connaissance en électronique, surtout en ce qui concerne les capteurs et les différents appareils de mesures qu'on utilise.

Ici on va faire une étude concernant un appareil qui détecte et mesure la distance d'un objet dans un milieu. Il s'agit en fait d'un Rdar, qui est un appareil qu'on utilise beaucoup en ce moment, le Radar fait partie de ces différents appareils modernes qui nous facilitent les tâches compliquées. Le manque de connaissance empêche les futurs ingénieurs et même les ingénieurs d'améliorer leur travail, c'est pourquoi on va faire une étude concernant cet appareil.

## Table des matières

<b>1- INTRODUCTION</b>	1
1-1- Définition	1
1-2- Origine du mot	1
1-3- Les importances du radar	1
1-4- Notion de polarisation	2
<b>2- GENERALITE DE FONCTIONNEMENT</b>	3
<b>3- DIFFERENTS TYPES DE RADAR ET LEUR FONCTIONNALITE</b>	4
3-1- Les radars terrestres	4
3-2- Les radars aériens	9
3-3- Les radars marins	16
<b>4- MODE DE MESURE</b>	21
<b>5- CONCLUSION</b>	27
<b>6- GLOSSAIRE</b>	28
<b>7- Bibliographie et Webographie</b>	29

## Table des illustrations

Figure 1: Principe de fonctionnement .....	4
Figure 2: Radar à Doppler .....	6
Figure 3: Police radar .....	6
Figure 4: Radar pulsé.....	8
Figure 5:Principe du sondage radar pulse .....	8
Figure 6:Principe du sondage radar .....	9
Figure 7: Radar aérien primaire.....	10
Figure 8: Radar aérien secondaire .....	11
Figure 9:Exemple de panneau de contrôle d'un transpondeur de mode S.....	14
Figure 10:Diagramme opérationnel d'un transpondeur moderne. ....	16
Figure 11:• antenne radome sur un bateau.....	17
Figure 12:Antennes ouvertes sur un bateau .....	18
Figure 13: Relation trigonométrique simple entre l'élévation et la hauteur. ....	22
Figure 14:relation entre l'altitude et la hauteur à l'étude de la terre coude .....	23
Figure 15: Distance aveugle .....	25
Figure 16:Angle de site $\epsilon$ .....	25



## 1- INTRODUCTION

### 1-1- Définition

Le **radar** (acronyme issu de l'anglais *radio detection and ranging*) est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour détecter la présence et déterminer la position ainsi que la vitesse d'objets tels que les avions, les bateaux, ou la pluie.

(wikipédia, 2024)

### 1-2- Origine du mot

Le mot *radar* est un néologisme obtenu par lexication de RADAR, acronyme de l'anglais *RAdio Detection And Ranging<sup>1</sup>* (« détection et estimation de la distance par onde radio », « détection et télémétrie radio » ou plus simplement « radiorepérage »). Cet acronyme d'origine américaine a remplacé le sigle anglais précédemment utilisé, RDF (*Radio Direction Finding*, « radiocompas »). Son usage est devenu si prévalent qu'il n'est plus perçu comme un acronyme mais est devenu un anacronyme, un nom commun.

### 1-3- Les importances du radar

Le radar est un outil crucial dans de nombreux domaines, car il permet de détecter et suivre des objets à distance. Voici ses principales utilisations :

\_Sécurité aérienne: Surveillance du trafic aérien, gestion des vols et prévention des collisions.

\_Sécurité maritime : Suivi des navires, prévention des accidents et gestion de la navigation en mer.

\_Météorologie : Détection des précipitations et des phénomènes climatiques (tornades, orages).



\_Transport automobile : Aide à la conduite (voitures autonomes, systèmes de sécurité).

\_Recherche et sauvetage : Localisation des personnes disparues ou des objets en mer ou en montagne.

\_Industrie et sciences : Surveillance de sites sensibles, étude géophysique et télédétection.

En résumé, le radar améliore la sécurité, la gestion des risques et la surveillance dans de nombreux secteurs.

### 1-4- Notion de polarisation

La polarisation d'une onde est définie par l'orientation de son champ électrique :

- une onde, dont le champ électrique est contenu dans un plan horizontal, est dite de « polarisation horizontale » ;
- une onde, dont le champ électrique est contenu dans un plan vertical, est dite de « polarisation verticale » ;
- la combinaison de deux ondes en phase, l'une de polarisation horizontale, l'autre de polarisation verticale, engendre une onde de « polarisation oblique » ;
- la combinaison de deux ondes d'égale amplitude, en quadrature, l'une de polarisation horizontale, l'autre de polarisation verticale, engendre une onde de « polarisation circulaire » ;
- la combinaison de deux ondes de phase et/ou amplitude quelconques, l'une de polarisation horizontale, l'autre de polarisation verticale, engendre une onde de « polarisation elliptique ».





## 2- GENERALITE DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement de tous les radars repose sur le même principe de base : l'émission d'ondes électromagnétiques, puis l'analyse des ondes réfléchies par les objets. Voici un aperçu simplifié de ce fonctionnement :

### 1. Émission des ondes

Le radar émet une onde électromagnétique (généralement des micro-ondes ou des ondes radio) via une antenne. Ces ondes voyagent à la vitesse de la lumière.

### 2. Réflexion des ondes

Lorsque ces ondes rencontrent un objet (comme un avion, un navire, un véhicule ou même des phénomènes météorologiques), elles sont partiellement réfléchies par celui-ci.

### 3. Retour des ondes

Les ondes réfléchies retournent vers l'antenne du radar, où elles sont captées par un récepteur.

### 4. Analyse du signal

Le radar mesure le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal. Cela permet de calculer la **distance** de l'objet.

### 5. Détermination de la direction et de la vitesse

- **Direction** : L'antenne du radar tourne souvent ou est orientée dans une direction particulière pour déterminer la position exacte de l'objet dans l'espace.
- **Vitesse** : En mesurant la variation de fréquence des ondes réfléchies (effet Doppler), le radar peut aussi estimer la vitesse de l'objet.

### 6. Affichage et interprétation

Les données recueillies sont ensuite traitées par un ordinateur, et les informations sur la position, la vitesse et parfois la taille de l'objet sont affichées sous forme de carte ou d'écran de contrôle pour les opérateurs.

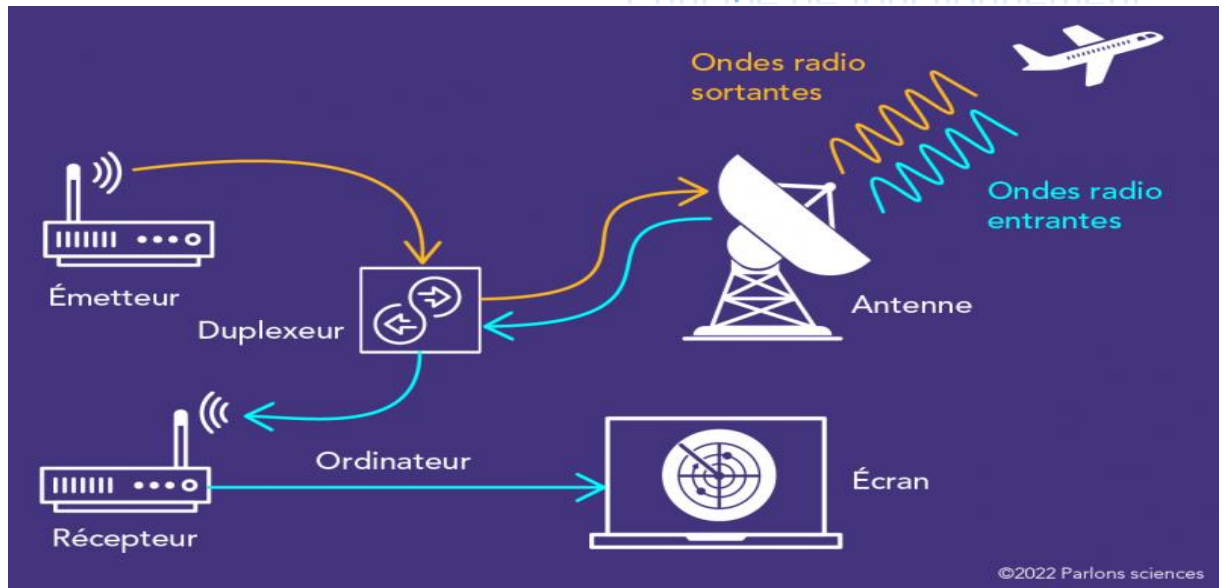


Figure 1: Principe de fonctionnement

## 3- DIFFERENTS TYPES DE RADAR ET LEUR FONCTIONNALITE

Il existe plusieurs types de radar dont chacun a sa propre utilité et fonctionnalité. Que ce soit terrestre, aérienne, maritime, chacun de ces domaines a son propre radar spécifié pour répondre aux besoins spécifiques de détection et de surveillance dans son environnement respectif.

### 3-1- Les radars terrestres

Les radars terrestres sont des dispositifs utilisés pour détecter des objets à distance en envoyant des ondes électromagnétiques (souvent des ondes radio) qui rebondissent sur l'objet et reviennent au radar. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la sécurité, la navigation, la météorologie, l'aviation, la surveillance des frontières et plus encore. Voici les différents types de radars terrestres, leur utilité, spécifications et fonctionnement détaillé.

#### 1- Radar Doppler

**Utilité :**



Le radar Doppler est principalement utilisé pour mesurer la vitesse des objets en mouvement, comme les véhicules, les avions, ou les systèmes météorologiques pour suivre les tempêtes.

### Description

Un radar Doppler est un radar qui produit, entre autres, une mesure de la vitesse. Il existe différents types de radars Doppler : pulsé cohérent, à ondes entretenues ou à modulation de fréquence. Le radar à ondes entretenues est un cas particulier qui ne peut fournir que des indications de vitesse. Les premiers radars Doppler étaient de ce type et ont conduit rapidement au développement de radars à modulation de fréquence qui, en faisant varier la fréquence de l'émetteur, permettent de déterminer la distance de la cible. Mais ces deux types de radars (à ondes entretenues et à modulation de fréquence) ne permettent de suivre qu'une seule cible à la fois ce qui limite leur usage. Avec l'arrivée des techniques numériques, le « radar Doppler pulsé » apparaît, et simultanément, les méthodes de calcul pour les radars pulsés cohérents.

### Spécifications :

- **Fréquence de fonctionnement** : Généralement entre 1 et 10 GHz.
- **Portée** : Quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres.
- **Résolution** : Moyenne à élevée, selon la fréquence et la configuration.
- **Précision** : Haute précision pour la mesure de la vitesse (par effet Doppler).;

### Principe de base

Un radar Doppler de base 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 à fréquence est réfléchi par la cible et comparé en fréquence avec le signal original aller et retour (est la fréquence reçue). Il permet ainsi une mesure directe et extrêmement précise de la composante vitesse de la cible dans l'axe du faisceau. Une correction doit donc être appliquée pour obtenir sa vitesse réelle si l'opérateur connaît l'angle de déplacement de la cible par rapport à la radiale au radar.



## Principe de fonctionnement

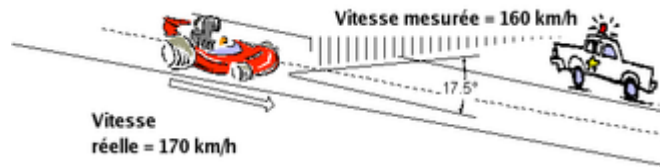


Figure 2: Radar à Doppler

Radar Doppler routier qui mesure la vitesse relative de déplacement.

En combinant radar Doppler et radar pulsé on obtient une meilleure précision sur la vitesse et la position. Cette vitesse est appelée « portée-taux » et décrit la valeur de la vitesse radiale avec laquelle la cible s'approche ou fuit du radar. Ainsi, le signal émis par le radar routier vers la voiture dans la figure de droite est réfléchi avec une variation de fréquence qui dépend de la vitesse et de l'angle du radar par rapport à la cible, ici 160 km/h. Ce n'est cependant pas la vitesse réelle, 170 km/h, puisque que cet angle n'est pas zéro.

Il est à noter qu'une cible pour laquelle la vitesse est nulle réfléchit une fréquence qui est la même que celle de l'émetteur ce qui veut dire de deux choses l'une : que la cible a une vitesse réellement nulle ou qu'elle se déplace tangentielllement au faisceau radar. En effet, toute cible dont la trajectoire est à 90 degrés par rapport au faisceau radar ne change pas de position radiale par rapport au radar et donc ne peut pas être détectée par sa vitesse, uniquement par sa réflectivité conventionnelle.

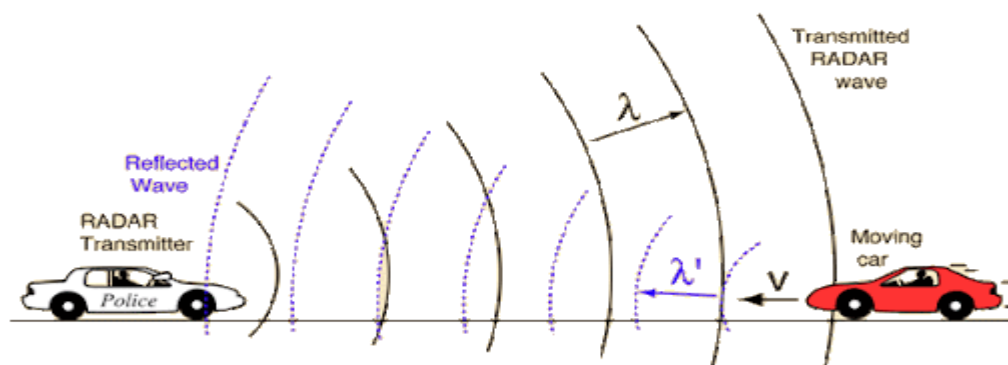


Figure 3: Police radar

Source 2 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_Dopple](https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_Dopple)



### 2- Radar à Doppler pulsé

Un **radar Doppler pulsé** est un radar capable, non seulement de donner la direction, la distance et l'altitude d'une cible, mais aussi de mesurer sa vitesse radiale <sup>2</sup> (*portée-vitesse*). Pour cela il utilise l'effet Doppler<sup>2</sup>. Le retour des impulsions radioélectriques <sup>2</sup> renvoyées par réflexion sur la cible sont traitées pour calculer le glissement de fréquence entre l'onde émise et celle qui est reçue. Pour cela, le système d'émission doit avoir une excellente stabilité de phase, on dit, dans ce cas, qu'il est «cohérent ».

La nature même des radars pulsés, et la relation qui existe entre la fréquence de la porteuse et la référence des répétitions des impulsions radar font que le spectre de référence peut être très complexe et risque de conduire à des erreurs. En général, pour éviter le repliement de spectre, on choisit  $f_r$  très élevée, mais ce choix peut occasionner des effets secondaires comme l'affichage de plusieurs distances pour une seule cible. Pour éviter cela, on utilise plusieurs fréquences d'impulsions différentes.

#### **Principe de base**

Le radar pulsé Doppler est basé sur deux prémisses. La première est que la position de la cible peut être calculée en notant le temps entre l'émission d'une impulsion radar et son retour de la source. La seconde sur le fait qu'une cible se déplaçant avec une vitesse radiale  $V_r$  non nulle par rapport au faisceau radar provoque un glissement de fréquence entre la fréquence de référence de l'émetteur  $f_t$  et celle de la porteuse reçue après réflexion sur la cible.

#### **Paramètre de l'acquisition**

Pour une acquisition de radar pulsé Doppler, un ensemble de paramètres sont choisis. La fréquence de référence de l'émetteur  $f_t$ , la référence des répétitions des impulsions radar FRI déterminant ainsi l'intervalle de répétition des impulsions (en anglais PRI pour *Pulse Repetition Interval*) puisque l'un est l'inverse de l'autre et le temps d'émission  $T_p$  de l'impulsion (le temps d'écoute n'est autre que ).

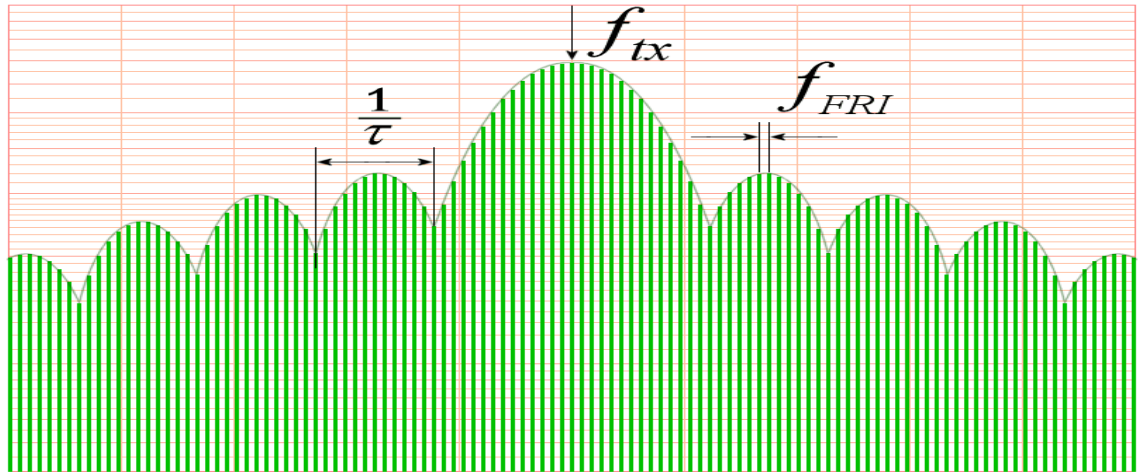


Figure 4: Radar pulsé

## Position



Figure 5: Principe du sondage radar pulse

Entre chaque impulsion, l'antenne et le circuit électronique sont mis à l'écoute de l'impulsion de retour pendant une durée TPRI- $T_p$ . Une fois l'impulsion reçue, on calcule la distance  $r$  entre le radar et les précipitations par la relation  $r = Ct/2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière valant 299 792 458 m/s). La distance maximale  $r_{max}$  qu'on peut sonder sans ambiguïté dépend de  $t_{PRI}$ . En effet, la position de tout retour qui arrive d'une première impulsion, après qu'une seconde impulsion est partie, sera mal interprétée comme revenant de cette dernière:  $r_{max} = c T_{pri}/2$ . De même, la distance minimale  $r_{min}$  que l'on peut sonder dépend de  $t_P$  puisque pendant ce temps, le radar est en émission et non en réception:  $r_{min} = ct_P/2$ .



## 3-2- Les radars aériens

Les **radars de contrôle aérien** sont des radars utilisés par le contrôle aérien pour repérer, suivre et guider les avions dans l'espace de vol en route ou autour d'un aéroport. Les radars primaires ont progressivement été complétés ou remplacés par des radars secondaires (utilisant des transpondeurs à bord de l'avion).

### 1- Les radars primaires

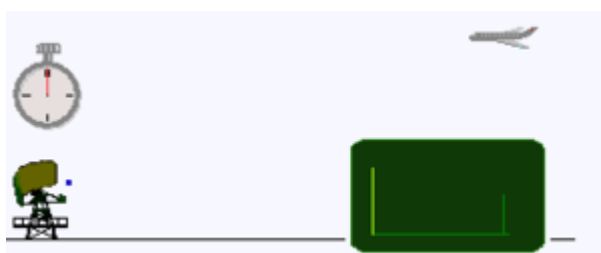


Figure 6: Principe du sondage radar

Ces radars utilisent le principe de l'écho. Ils émettent des impulsions d'ondes électromagnétiques et détectent le retour de ces impulsions après leur réflexion sur les cibles. La différence de temps entre l'émission et la réception détermine la distance de la cible par rapport à l'antenne. La position de l'antenne lors de la réception de l'écho, ainsi qu'un calcul correcteur (l'antenne tourne continuellement), détermine l'azimut de la cible<sup>1</sup>.

Certains ne sont pas capables de détecter l'altitude des cibles, comme les radars en route, car ils utilisent un faisceau à large ouverture verticale pour la détection générale. Mais ce n'est pas le cas des radars à balayage conique, à faisceaux multiples, radar de site, et d'approche de précision comme pour ic qui peuvent trouver l'élévation des aéronefs au-dessus de l'horizon.



**La puissance des impulsions** émises est un des facteurs déterminant le rayon maximum de détection du radar (couverture). **La puissance des impulsions émises** fait référence à l'énergie envoyée par le radar sous forme d'ondes. Plus cette puissance est élevée, plus l'onde a de chances de parcourir une distance longue avant de devenir trop faible pour être détectée.

Le **rayon maximum de détection du radar** (ou la couverture du radar) dépend donc en grande partie de la puissance des impulsions émises. Si la puissance est trop faible, l'écho renvoyé par une cible située à une grande distance peut être trop faible pour être détecté. À l'inverse, une puissance plus élevée permet de détecter des cibles plus lointaines.

L'introduction de la technique de compression d'impulsion a permis de réduire la puissance instantanée des impulsions émises, ce qui nécessite des équipements moins coûteux.

Parmi les types de radars primaires, il existe tout d'abord les **radars primaires d'approche**, implantés dans les aéroports. Ils ont pour but de détecter tous les aéronefs s'approchant d'un aéroport, notamment ceux qui ne seraient pas équipés de transpondeur qui ne seraient donc pas détectables par un radar secondaire.

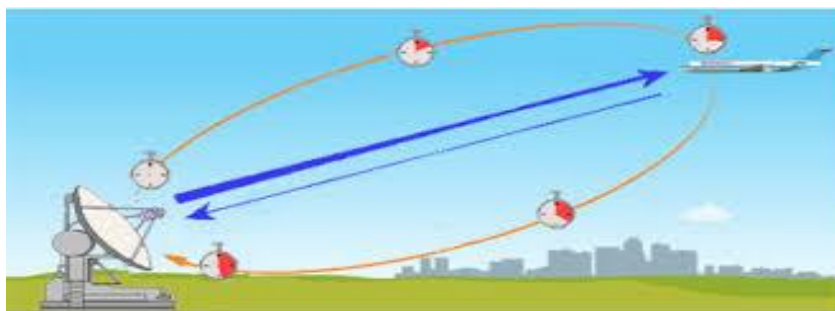


Figure 7: Radar aérien primaire

## 2- Les radars secondaires

Ces radars utilisent le principe de dialogue et non de l'écho localisation. Les radars secondaires émettent des suites d'impulsions d'ondes électromagnétiques représentant des messages d'interrogation. Les





## Principe de fonctionnement

transpondeurs à bord des avions détectent ces interrogations, les décodent, et émettent à leur tour des suites d'impulsions d'ondes électromagnétiques représentant les réponses à chaque interrogation reçue. Le radar détermine l'azimut de l'avion par l'angle de réception et la distance de l'appareil par le temps de retour du message.

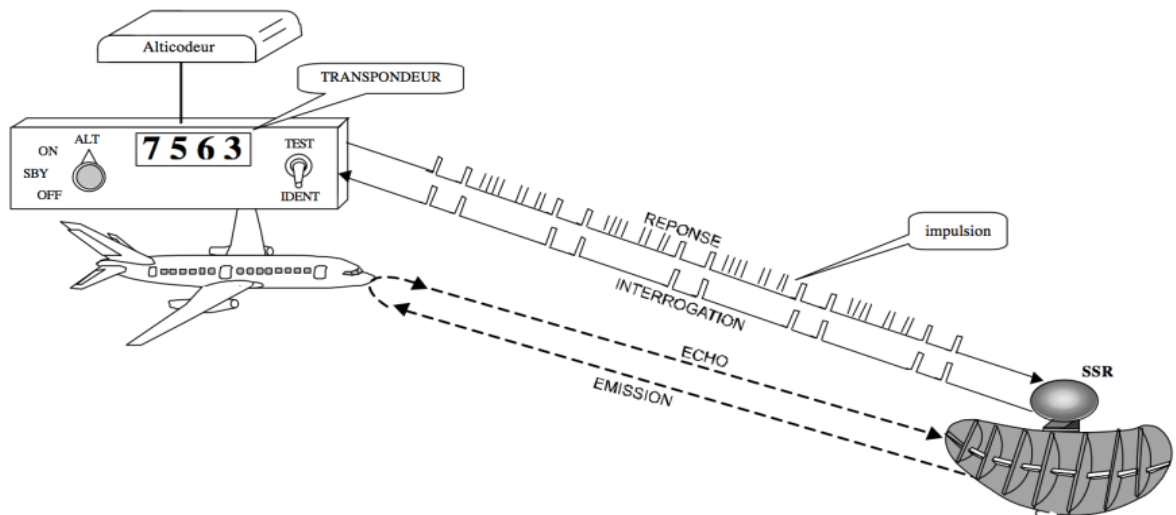


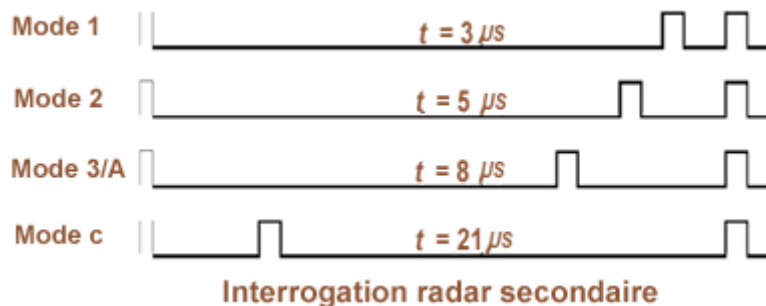
Figure 8: Radar aérien secondaire

Pour le radar secondaire, seule la partie aller est nécessaire, car le signal de retour est envoyé par l'avion lui-même. Ces radars n'ont donc qu'à tenir compte d'une perte de l'énergie électromagnétique et nécessite beaucoup moins d'énergie à l'utilisation pour une même portée utile. Étant donné que le transpondeur transmet un signal beaucoup plus fort que celui qui est réfléchi par un avion dans les systèmes de radar primaire, il est possible d'obtenir une plus grande portée et une plus grande fiabilité avec le radar secondaire et d'utiliser des équipements au sol moins chers et plus efficaces. En outre, des informations chiffrées telles que l'altitude et un code peuvent être ajoutées au signal de retour du transpondeur, qui est ensuite affiché sur l'écran de l'opérateur.

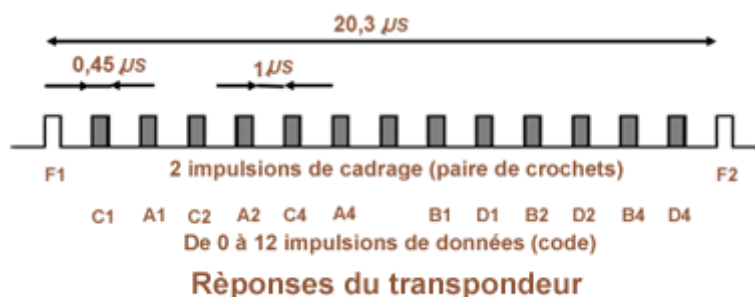
Le radar secondaire par lui-même ne peut distinguer l'altitude de la cible et c'est par l'interrogation qu'il l'obtient. On distingue deux types de radars secondaires :



**Le radar secondaire classique.** Différents modes : **Mode 1et 2** : identification militaire basique. **Mode 3/A** : Mode alpha, identification avion par un code unique à 4 chiffres (4096 combinaisons). Lorsqu'un SSR interroge un transpondeur en mode A, le transpondeur répond avec l'identification de l'avion (code SQWK). Bien que 4 096 codes d'identité différents disponibles dans une réponse en mode A puissent sembler suffisants, une fois que des codes particuliers ont été réservés à des fins d'urgence et autres, le nombre est considérablement réduit. **Mode C** : Information de l'altitude de l'aéronef. Lorsqu'un SSR interroge un transpondeur en mode C, le transpondeur répond par l'altitude barométrique de l'avion. Le mode C fournit des incréments de hauteur de 100 pieds, ce qui était initialement adéquat pour surveiller les aéronefs séparés d'au moins 1000 pieds. Cependant, comme l'espace aérien devenait de plus en plus encombré, il devenait important de surveiller les aéronefs avec des séparations plus petites.



Le transpondeur de l'aéronef détecte ces messages et répond par un train d'impulsions spécifiques contenant des impulsions constituant des mots de données. Le récepteur du radar secondaire reçoit ces signaux avant extraction et pistage.



**Les radars secondaires Mode S**, qui sont une évolution des radars secondaires classiques, permettent :



## Principe de fonctionnement

- \_l'interrogation sélective (donc sans ambiguïté) des avions équipés d'un transpondeur compatible Mode S, ainsi qu'un véritable échange de données entre le radar et l'avion. Il est possible de demander à l'avion toutes sortes d'informations. Un des principaux buts de l'interrogation sélective est de limiter la quantité d'ondes électromagnétiques émises dans l'atmosphère ;
- \_une meilleure intégrité des données par vérification de parité ;
- \_information d'altitude plus précise.

Source 4: <https://www.lavionnaire.fr/RadarATCSecondaire.php>

Source 5:

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_de\\_contr%C3%B4le\\_a%C3%A9rien](https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_de_contr%C3%B4le_a%C3%A9rien)

### ***Transpondeur***

Le travail du radar secondaire dépend de la présence dans les aéronefs d'un transpondeur (contraction de **Trans**metteur-ré**pondeur**) qui puisse répondre aux interrogations lancées par les stations de contrôle au sol. Les messages de celui-ci permettent d'identifier les appareils en vol et de connaître certaines informations supplémentaires comme son altitude.

Les transpondeurs plus récents reçoivent les interrogations grâce à deux antennes, une sur le dos et l'autre sur le ventre de l'avion, et deux récepteurs. L'appareil peut ainsi pallier au blocage du signal par une partie du fuselage. Les informations provenant de l'avionique à bord de l'avion servent à construire les réponses.

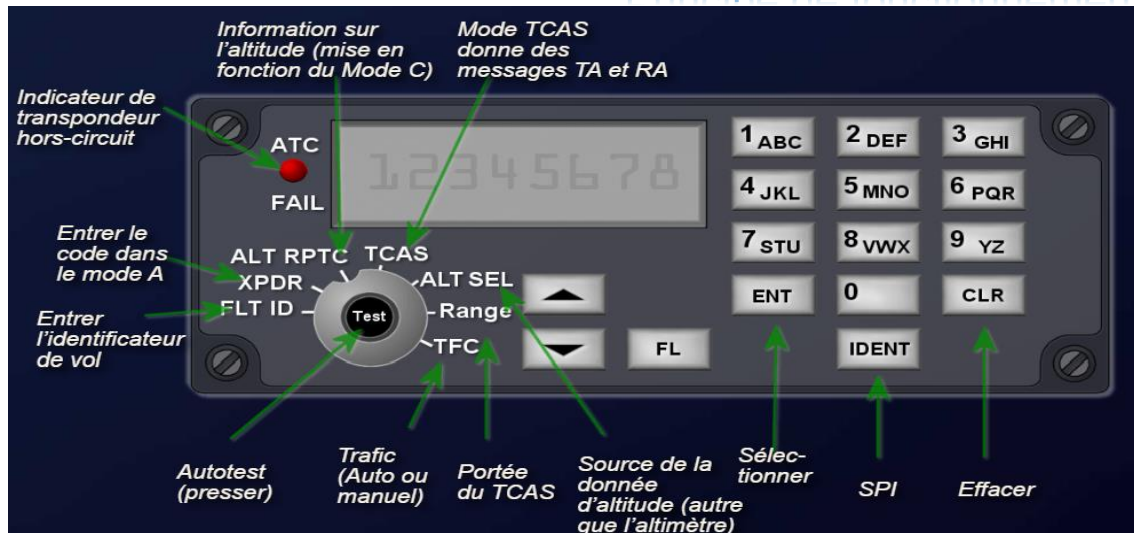


Figure 9: Exemple de panneau de contrôle d'un transpondeur de mode S

Le transpondeur conserve les données techniques dans une banque de 256 mémoires, chacune de 56 bits, qui est rafraîchie régulièrement et prête à être envoyée à toute station d'interrogation au sol. Chaque mémoire contient les informations pour une réponse particulière du mode S ou du « squitter » (Réponse erratique). Elles sont aussi appelées mémoire du protocole initié au sol (en anglais **GICB** pour **Ground Initiated Comm B**) dont le fonctionnement est décrit dans le « Manuel des services spécifiques du mode S » (Doc. 9688 de l'OACI).

Chaque mémoire est identifiée par deux nombres hexadécimaux (ex. Mémoire 05hex ou dans certains cas écrit 0,5, est la mémoire pour le « squitter »). Les mémoires qui ne sont pas mise à jour à l'intérieur du délai prescrit sont remises à zéro par le transpondeur.

Mémoire	Contenu
BDS 01h	Rapport sur la disponibilité du lien de communication
BDS 02h	Identification de l'aéronef
BDS 03h	Avis de résolution (RA) du système anticollision embarqué (ACAS)
BDS 04h	Paramètres choisis d'altitude (Bits 28 à 40: pression barométrique)

BDS 05h	« Squitter » de la position en vol
BDS 06h	« Squitter » de la position par rapport au sol
BDS 07h	« Squitter » de l'état du transpondeur (seulement sur demande spéciale)
BDS 08h	« Squitter » de l'identification et la catégorie de l'aéronef
BDS 09h	« Squitter » sur la vitesse de l'aéronef
BDS 0Ah	« Squitter » d'événement
BDS 61h	« Squitter » des urgences et priorités (transmission une fois par seconde durant une urgence)
BDS 65h	État opérationnel de l'aéronef

Tableau 1 : Contenu de certaines mémoires courantes de la banque de données binaires du transpondeur.

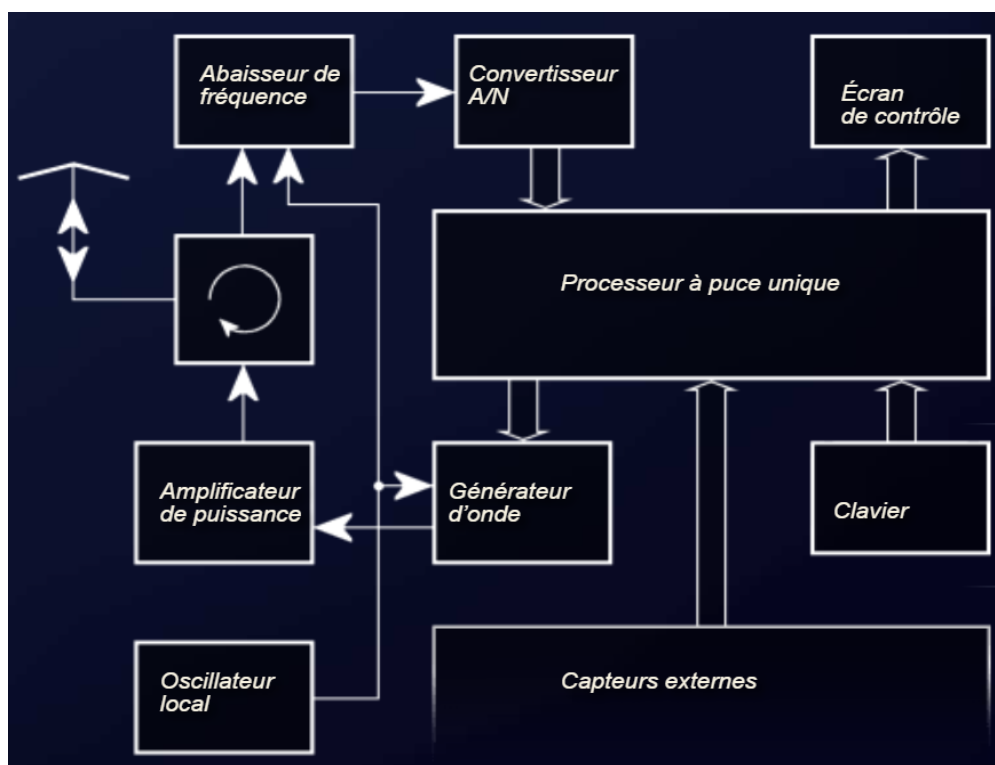




Figure 10: Diagramme opérationnel d'un transpondeur moderne.

Source 6: <https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr17.fr.html>

### 3-3- Les radars marins

#### **Qu'est-ce qu'un radar marin ?**

Un radar marin est un système de géolocalisation maritime utilisant des ondes pour détecter et avertir des obstacles ou d'éléments mobiles et mesurer les distances jusqu'à eux, tels que des bateaux, des aéronefs, des véhicules, des poissons, des récifs, des bouées, voire des formations météorologiques.

#### **Comment fonctionne un radar marin ?**

Son fonctionnement consiste à émettre une fréquence radio à haute intensité ou une fréquence micro-ondes (selon la technologie du radar) et à détecter des objets grâce au retour de la fréquence ou de l'onde émise. Cela s'explique par le fait que l'onde que nous émettons entre en collision avec l'objet à détecter et rebondit, ce qui nous permet de déterminer la distance en fonction du temps mis par notre onde pour revenir.

#### **Composants d'un radar marin**

Un radar marin se compose généralement de :

- Un émetteur radio à haute fréquence chargé de générer et d'envoyer une fréquence ou une onde.
- Un récepteur, un dispositif capable de recevoir la même fréquence ou onde précédemment envoyée.
- Un moniteur ou écran à bord qui transmet les informations recueillies par les autres composants du radar, généralement sous forme de carte thermique.
- Une antenne, la partie du radar qui détecte les échos, élimine le bruit et fournit une image à l'écran.

#### **Types d'antennes de radar marin**



Il existe deux types possibles d'antennes sur un bateau :

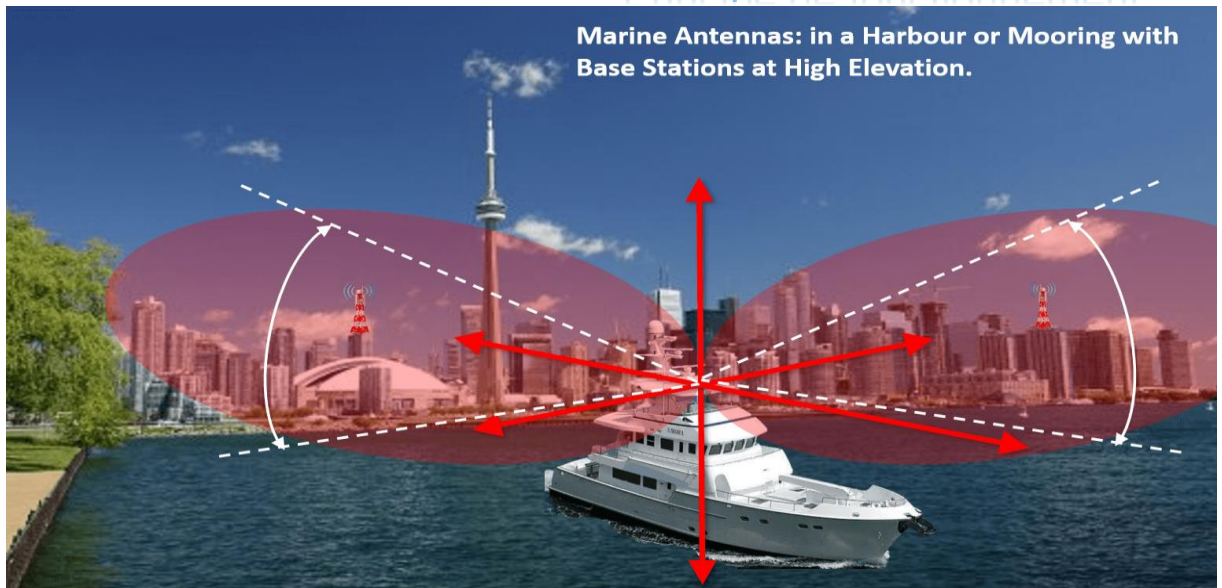
- Antenne Radome (fermée) : Ces antennes sont idéales pour les petits bateaux à moteur et les voiliers. Elles offrent d'excellentes performances, même dans des conditions défavorables. Le radôme est le revêtement protecteur de l'antenne. Étant légères, compactes et de petite taille, elles sont le meilleur choix lorsque l'efficacité énergétique est essentielle et que l'installation est limitée. De plus, ce type d'antenne consomme moins d'énergie que d'autres options, ce qui est un avantage pour la navigation à longue distance.



*Figure 11:• antenne radome sur un bateau*

- Antennes ouvertes : Ces antennes sont généralement présentes sur des navires de plus grande taille, tels que des yachts. Elles disposent d'un scanner ouvert offrant une portée et des performances optimales grâce à leur plus grande taille, leur antenne plus efficace et leur impulsion plus étroite. Elles offrent également des améliorations dans la résolution de la distance et du délai, ainsi qu'une séparation plus nette des cibles.





*Figure 12: Antennes ouvertes sur un bateau*

### Où est installée l'antenne radar ?

La portée du radar est limitée par la courbure de la Terre, donc la hauteur de l'appareil au-dessus de la surface de la mer et la hauteur de l'obstacle à percevoir déterminent la portée de détection du radar.

Plus l'emplacement du radar sur un bateau est élevé, plus grande est sa portée maximale. Cependant, cela augmentera également la portée minimale autour du bateau où les cibles ne seront pas détectées. C'est une considération importante lors des manœuvres, comme l'entrée dans un port par temps de brouillard ou dans l'obscurité, car les bouées, les bateaux amarrés et autres ne seront pas aussi facilement détectés à courte distance. Par conséquent, la hauteur d'installation recommandée pour le radar est au-dessus de la hauteur de la tête pour éviter une exposition à l'énergie électromagnétique émise par l'antenne du radar, ce qui pourrait être nocif pour la santé. L'emplacement idéal est le point le plus élevé du bateau, offrant une vue dégagée à 360 degrés.

De plus, le radar du bateau est généralement installé à l'avant du mât. En cas d'antenne fermée, son alimentation provient de sa connexion à l'écran via un câble multicœur composé de câbles d'alimentation positifs et négatifs. En revanche, les radars à antenne ouverte contiennent généralement un câble d'alimentation continu distinct pour leur antenne.





Source 7: <https://mercanautic.com/fr/blog/informations/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-les-radars-marins>

### Affichage des informations

Les données recueillies sont ensuite affichées sur un **écran radar**, souvent sous forme de **pulses lumineux** ou de **blocs** représentant des objets détectés.

Le radar peut afficher des informations sur la distance (en milles nautiques), la direction (en degrés) et la position des objets par rapport au navire.

### Les principales caractéristiques d'un radar marin

#### a. Portée

- La portée d'un radar marin (c'est-à-dire la distance à laquelle il peut détecter des objets) dépend de plusieurs facteurs, notamment la **puissance des impulsions émises**, la **sensibilité du récepteur** et les **conditions atmosphériques** (notamment la pluie ou les brouillards peuvent réduire la portée).

#### b. Résolution

- La **résolution** radar détermine la capacité à distinguer deux objets proches l'un de l'autre. Une haute résolution permet de discerner des objets proches, comme deux navires dans une zone étroite, tandis qu'une faible résolution pourrait entraîner une confusion.

#### c. Vitesse de rotation de l'antenne

- L'antenne radar tourne à une vitesse déterminée, ce qui permet au radar de scanner l'environnement autour du navire. Plus la vitesse de rotation est rapide, plus le radar peut afficher une mise à jour fréquente de la situation environnante.

#### d. Détection des cibles



## Principe de fonctionnement

- Le radar marin peut détecter différents types d'objets, qu'ils soient à la surface de l'eau (autres navires, bouées, obstacles) ou au-dessus de l'eau (par exemple des oiseaux ou des avions).
- Il peut également être utilisé pour détecter la **ligne de côte** ou des **cibles fixes** comme des phares ou des plateformes offshore.

### e. Affichage et interprétation

- L'image du radar est généralement représentée sous forme de cercles concentriques qui montrent la distance du navire. Les objets détectés apparaissent comme des points ou des contours.
- Un radar moderne peut aussi superposer cette image avec des **cartes électroniques** (système ECDIS), permettant une visualisation plus intuitive des informations.

## 4- MODE DE MESURE

### ***Calcul de la distance***

La distance est calculée à partir du temps de transit (aller et retour) d'une brève „impulsion radioélectrique“ émise et de sa vitesse de propagation  $c_0$ . La distance de l'écho (calculée par le radar) est la distance en ligne droite entre l'antenne du radar et la cible. La „distance-sol“ est la distance „horizontale“ entre l'antenne du radar et la cible: elle ne peut être déterminée que si l'on calcule l'altitude de la cible, ou son angle de site. Le temps mesuré par le radar est le temps nécessaire à l'impulsion pour aller de l'antenne à la cible, puis de la cible vers l'antenne après réflexion. Chaque impulsion revenant au radar a parcouru deux fois la distance radar-cible. La formule permettant de calculer cette distance est donc la suivante:

$$R = \frac{c_0 \cdot t}{2}$$

- $c_0$  = vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  m/s
- $t$  = temps mesuré [s]
- $R$  = distance [m]

La distance est dans ce cas exprimée en mètres. En divisant le résultat par 1852, on obtient la distance en milles nautiques.

### ***Calcul de l'altitude de la cible***

La hauteur d'une cible par rapport à la surface du globe terrestre est appelée altitude. Dans les formules et schémas de cette page, elle sera désignée par la lettre  $H$  (comme Hauteur). L'altitude peut être calculée à partir des mesures de distance  $R$  et d'angle de site  $\epsilon$ .

$$\sin \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypothénuse}}$$

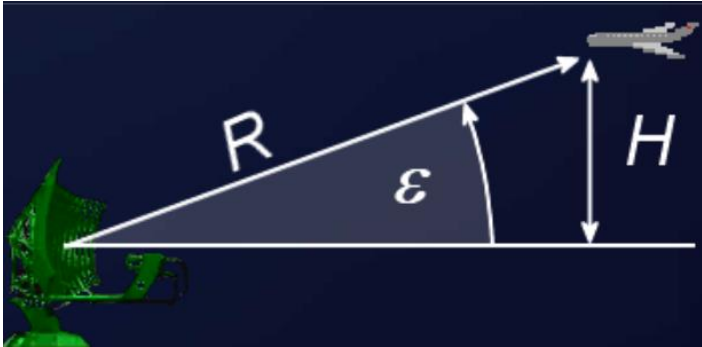


Figure 13: Relation trigonométrique simple entre l'élévation et la hauteur.

Nous insérons ces valeurs dans la formule:

$$H = R \cdot \sin \varepsilon$$

Dans la réalité, l'altitude précise d'un avion en vol ne peut être calculée aussi simplement car lors de la propagation des ondes électromagnétiques, une réfraction se produit à chaque fois qu'elles atteignent une couche de l'atmosphère de différente densité, la surface de la terre est courbe. Ces deux facteurs sont compensés dans les systèmes radars qui calculent l'altitude grâce à l'utilisation d'une formule plus complète.

Le calcul de l'altitude de la cible n'est pas uniquement la simple résolution d'une équation trigonométrique appliquée au triangle. La rotondité de la terre doit également être prise en compte.

$$H = R \cdot \sin \varepsilon + \frac{R^2}{2r_e}$$

- $R$  = distance de la cible en ligne droite
- $\varepsilon$  = angle de site mesuré
- $r_e$  = rayon moyen de la terre (environ 6370 km)
- (Cette formule n'est qu'approximative!)

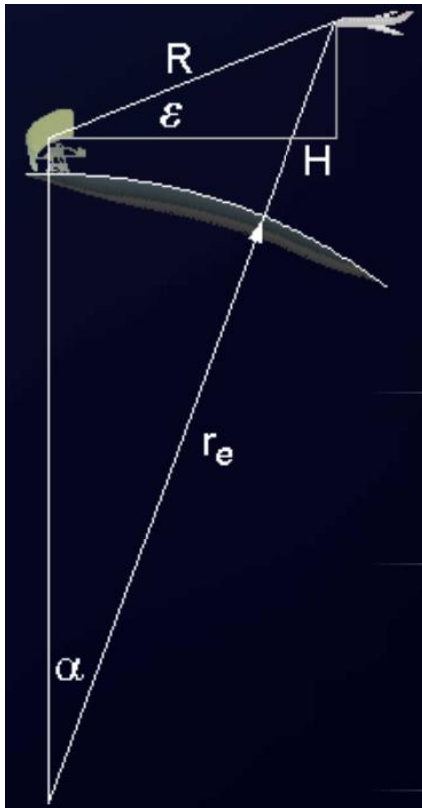


Figure 14: relation entre l'altitude et la hauteur à l'étude de la terre coude

On peut déterminer l'équation à partir de la Figure 10. Un triangle est formé par les points: centre de la terre, position géographique du radar, et position de la cible (avion). Les cotés du triangle sont ceux qui sont repris dans la formule du cosinus et donc dans l'équation suivante:

$$R^2 = r_e^2 + (r_e + H)^2 - 2r_e(r_e + H) \cdot \cos \alpha$$

En considérant que la terre est une sphère, l'arc de circonférence de la terre peut être calculé par le simple rapport entre la circonférence totale de la terre et l'angle  $\alpha$ :

$$360^\circ \cdot R_{topogr.} = \alpha \cdot 2\pi \cdot r_e$$

En pratique, cependant, la propagation des ondes électromagnétiques est soumise à la réfraction, c'est à dire que le faisceau d'ondes émis par le radar est un triangle dont les cotés sont courbés eux aussi, en fonction de:

- la longueur d'onde utilisée,
- la pression barométrique,



- la température de l'air
- le degré d'hygrométrie.

Pour tenir compte de la réfraction, le rayon dans la formule est changé pour le rayon de réfraction terrestre moyen ( $R_{\text{A}}$ ) égal à  $4/3 \cdot r_e \approx 8500 \text{ km}$  et un terme est ajouté pour tenir compte des valeurs actuelles de température, d'humidité et de pression.

Source 8: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Calcul%20de%20l%27altitude%20de%20la%20cible.fr.html>

### **Distance aveugle**

Un radar à impulsions monostatique utilise la même antenne à l'émission et à la réception. Pendant le temps d'émission, le radar ne peut pas recevoir: la réception est coupée. La distance minimum  $R_{\min}$  (« **distance aveugle** ») est la distance minimum à laquelle doit se trouver une cible pour pouvoir être détectée. Pour cela il est nécessaire que l'impulsion émise ait entièrement „quitté“ l'antenne et que le radar ait remis en fonction son récepteur ( $t_{\text{récupération}}$  = temps de mise en service du récepteur). Ainsi donc le temps de transmission doit être le plus court possible si l'on veut détecter des objets très proches.

$$R_{\min} = \frac{c_0 \cdot (\tau + t_{\text{récupération}})}{2}$$

Les cibles situées à une distance équivalente à la durée d'impulsion ne sont pas détectées. Une impulsion  $\tau$  de  $1 \mu\text{s}$  (typiquement pour un radar de veille rapprochée) génère une distance aveugle d'environ 150 m, valeur couramment acceptable. Cependant, les radars à impulsions longues doivent supporter une distance aveugle relativement importante, et notamment les radars à compression d'impulsions, qui émettent parfois des impulsions de plusieurs dizaines, voire centaines de microsecondes.

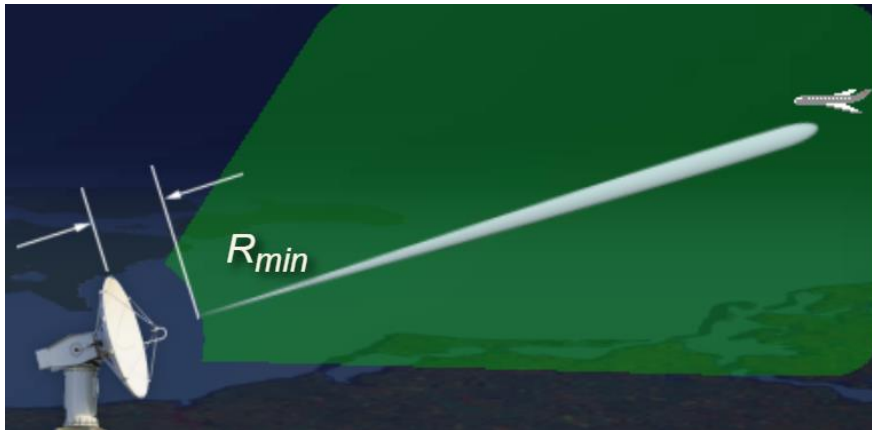


Figure 15: Distance aveugle

### La mesure de l'angle de site de la cible

Les radars d'altimétrie rayonnent un faisceau (ou lobe) très étroit dans le plan vertical. Ce faisceau est déplacé suivant un axe vertical, mécaniquement ou électroniquement, afin de balayer en site son volume de détection et d'y positionner les cibles. Les radars d'altimétrie ayant également la capacité de déterminer l'azimut des cibles doivent utiliser un faisceau étroit tant dans le plan vertical que dans le plan horizontal.

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

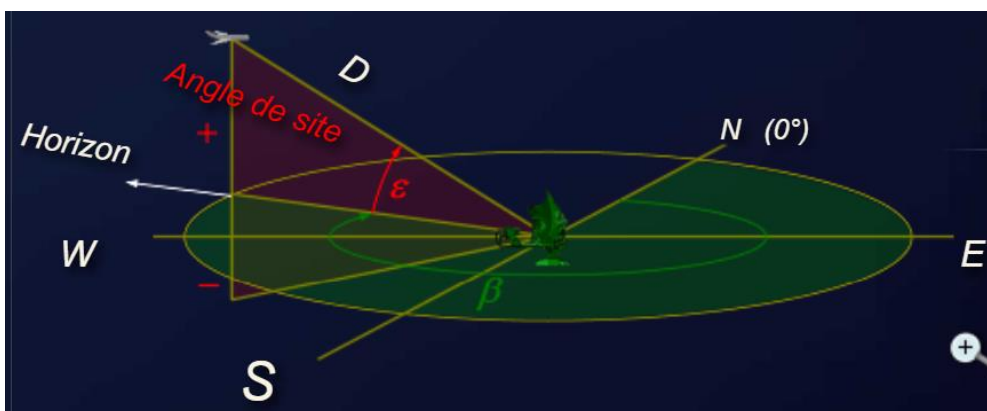


Figure 16: Angle de site  $\epsilon$



Source9: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Mesure%20de%20l%27angle%20de%20site.fr.html>

### Calcule de la Vitesse

La formule de la fréquence reçue de la cible dépend de la vitesse de la lumière dans l'air ( $c'$  légèrement plus faible que celui dans le vide) et  $v$  la vitesse de la cible et

$F_t$  : Le signal micro-onde émis par l'antenne directionnelle du radar à fréquence ; est la fréquence reçue

La variation Doppler est donc :  **$F_d = F_r - F_t = 2vF_t(c' - v)$**

Comme pour la gamme habituelles de cibles d'un radar, la vitesse est beaucoup plus petite que celle de la lumière ( $v \ll c$ ), il est possible de simplifier avec  $(c' - v) \approx c'$ .

Donc :  **$F_d = 2vF_t c'$**

Source 10 : <https://www.radartutorial.eu/index.fr.html>





## 5- CONCLUSION

Dans ce rapport, nous avons exploré en détail le monde des radars, en commençant par leur définition et leur origine. Nous avons aussi vu à quel point ces technologies sont importantes, notamment dans le domaine de la sécurité.

On a ensuite expliqué comment fonctionnent les radars, en se concentrant sur les trois grands types : les radars terrestres, aériens et marins. Chaque type est conçu pour répondre à des besoins spécifiques, et leur fonctionnement repose sur des technologies de plus en plus avancées.

On a également abordé la notion de polarisation, un concept essentiel pour améliorer la précision des mesures radar, et les différents modes de mesure qui permettent de tirer le meilleur parti de ces outils. En résumé, ce rapport offre une vue d'ensemble complète des radars, en montrant à la fois leur fonctionnement et leurs applications dans différents domaines. Avec les progrès technologiques, on peut s'attendre à ce que ces systèmes continuent de se perfectionner et deviennent encore plus essentiels à l'avenir.

## 6- GLOSSAIRE

Néologisme: Tout mot de création récente ou emprunté depuis peu à une autre langue ou toute acception nouvelle donnée à un mot ou à une expression qui existaient déjà dans la langue.

Radiocompas: Goniomètre de bord qui permet à un avion ou à un navire de conserver une direction grâce aux indications données par une station émettrice au sol au moyen des ondes radioélectriques.

L'azimut: est l'angle formé par le vecteur nord et le vecteur de l'étoile sur le plan horizontal . L'azimut est généralement mesuré en degrés ( $^{\circ}$ ), dans la plage positive de  $0^{\circ}$  à  $360^{\circ}$  ou dans la plage signée de  $-180^{\circ}$  à  $+180^{\circ}$ . Ce concept est utilisé en navigation, en astronomie, en ingénierie, en cartographie, en exploitation minière et en balistique.

Horizon: Limite circulaire de la vue, pour un observateur qui en est le centre.

La compression d'impulsion: est une technique de traitement du signal utilisée dans le domaine du radar afin d'augmenter la résolution en distance de la mesure ainsi que le rapport signal sur bruit.



## 7- Bibliographie et Webographie

(wikipédia, 2024

Source 2 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_Dopple](https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_Dopple)

Source 3 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_Doppler\\_pulsé](https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_Doppler_pulsé)

Source 4: <https://www.lavionnaire.fr/RadarATCSecondaire.php>

Source 5:

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_de\\_contr%C3%B4le\\_a%C3%A9rien](https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_de_contr%C3%B4le_a%C3%A9rien)

Source 6: <https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr17.fr.html>

Source 7: <https://mercanautic.com/fr/blog/informations/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-les-radars-marins>

Source 8:<https://www.radartutorial.eu/01.basics/Calcul%20de%20l%27altitude%20de%20la%20cible.fr.html>

Source9:<https://www.radartutorial.eu/01.basics/Mesure%20de%20l%27angle%20de%20site.fr.html>

Source 10 : <https://www.radartutorial.eu/index.fr.html>