

# Radartutorial

## Chapitre 1: Notions de base

(Éditeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision:  
Pierre Vaillant et Christophe Paumier, Version 9 juillet 2011)

### Sommaire

Objectifs.....	1
Résumé historique.....	2
<b>PRINCIPE DE BASE DU RADAR.....</b>	<b>3</b>
<b>CLASSIFICATION DES SYSTEMES RADARS.....</b>	<b>4</b>
<b>COMPOSANTES PRINCIPALES.....</b>	<b>6</b>
Le transmetteur.....	6
L'antenne.....	6
Récepteur.....	9
<b>INTERDÉPENDANCES TEMPORELLES.....</b>	<b>10</b>
<b>L'EQUATION DU RADAR.....</b>	<b>11</b>
Distance maximale de détection.....	14
Influence du sol.....	15
Surface équivalente radar.....	16
<b>POSITIONNEMENT DE LA CIBLE.....</b>	<b>17</b>
Calcul de la distance.....	17
Mesure de la direction.....	18
Angle de site et altitude.....	19
<b>VITESSE RADIALE DOPPLER.....</b>	<b>20</b>
<b>RESOLUTION.....</b>	<b>22</b>
Cellule de résolution.....	22
Résolution en distance.....	22
Résolution angulaire.....	23
<b>AMBIGUÏTES.....</b>	<b>24</b>
Ambiguïté distance.....	24
Distance aveugle.....	25
Dilemme Doppler (ambiguïté Doppler).....	25

### Objectifs

Cette page donne les objectifs d'apprentissage de ce site. Le premier chapitre de Radartutorial expose au lecteur les fondements mathématiques de la technologie du radar et permet de comprendre le chapitre suivant qui introduit les différents types de radar. Il explique graduellement la théorie du radar, de la propagation du faisceau, des échos de retour et de l'équation qui relie la puissance émise versus celle retournée par les cibles. Le chapitre donne également un aperçu des différentes applications du radar.

À la fin du premier chapitre, l'étudiant devrait comprendre les notions de bases du radar et reconnaître les paramètres qui influencent les spécifications des radars primaires.

- L'étudiant devrait donc être capable:
- d'expliquer l'opération d'un radar à onde continue, à impulsion et;
- de définir les notions de portée, de direction et d'altitude par rapport à un radar;
- de discuter comment la longueur de l'impulsion, la puissance d'émission et la largeur du faisceau influencent la précision du radar;
- de décrire les facteurs qui peuvent détériorer la précision du radar;
- de déchiffrer un diagramme expliquant les composantes d'un radar et de leurs interactions.

## Résumé historique

Il serait vain de chercher à attribuer l'invention du Radar à un savant en particulier, ou à une nation unique. On doit plutôt considérer le « Radar » comme le résultat de l'accumulation de nombreuses recherches menées antérieurement, et auxquelles les scientifiques de plusieurs pays ont parallèlement participé. Au fil de cette histoire il existe néanmoins des points de repères qui correspondent à la découverte de quelques grands principes de base ou à des inventions importantes:

En **1865**, le physicien anglais James Clerk Maxwell développe sa théorie de la lumière électromagnétique (Description de l'onde électromagnétique et de sa propagation) et en 1886, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz démontra l'existence physique des ondes électromagnétiques qui confirment ainsi la théorie de Maxwell.

En **1904**, le technicien allemand spécialiste des ondes hertziennes, Christian Hülsmeyer, invente le «Telemobiloskop», appareil de prévention des collisions en mer. Il mesure le temps de parcours de l'onde électromagnétique, sur le trajet aller-retour, entre l'antenne et un objet métallique (navire). Un calcul de la distance est donc possible. Il s'agit du premier test pratique d'un appareil qui suit les principes de ce que sera le radar plus tard. Hülsmeyer dépose un brevet de son invention en Allemagne, en France et au Royaume-Uni.

En **1921**, Albert Wallace Hull développe un oscillateur à haut rendement, le magnétron, qui servira plus tard comme source de l'onde radar.

En **1922**, A. H. Taylor et L. C. Young, du Naval Research Laboratory (USA), détectent pour la première fois un navire en bois dans une expérience assez similaire à celle de Hülsmeyer. En **1930**, L. A. Hyland, également du Naval Research Laboratory, réalise la première détection d'un aéronef.

En **1934**, faisant suite à une étude systématique du magnétron, des essais sur des systèmes de détection par ondes courtes sont menés en France par la CSF (16 et 80 cm de longueur d'onde) selon les principes de Nicolas Tesla. Un brevet est déposé (brevet français n° 788795). Le premier équipa en 1934 le cargo Orégon, suivi en 1935 par celui du paquebot Normandie.

En **1935**, faisant suite à un brevet déposé par Robert Watson-Watt (l'inventeur dit « officiel » du radar) (brevet anglais GB593017), le premier réseau de radars est commandé par les Britanniques et portera le nom de code Chain Home. En 1936, Metcalf et Hahn développent le klystron. Utilisé comme amplificateur ou oscillateur, il sera un autre équipement important du radar.

Différents équipements radar sont développés aux USA, en Russie, en Allemagne, en France et au Japon, accélérées par la montée en puissance vers une guerre qui semble inévitable, et par le développement général de l'arme aérienne. Les recherches dans le domaine de la technologie radar génèrent des avancées techniques significatives durant la seconde guerre mondiale. Pendant la guerre froide, des radars sont déployés en grande quantité de part et d'autre du «rideau de fer», et en particulier le long des frontières allemandes.

D'autre part, le radar fait son apparition dans le domaine civil après le conflit. En premier, c'est le domaine de l'aviation civil qui en est équipée, permettant un rapide développement du contrôle aérien. Il se répand ensuite dans des domaines aussi divers que la détection des précipitations en météorologie, l'étude des planètes en astronomie, le contrôle de la vitesse sur les routes et la détection des artefacts archéologiques dans le sol.



Figure 1: Fascicule de brevet



Figure 2: Radar Würzburg géant allemand de la Seconde guerre mondiale.

## Principe de base du radar

Le terme **RADAR** est l'acronyme de **RA**dio **D**etecting **A**nd **R**anging. Le principe utilisé par les radars est voisin de celui de la réflexion des ondes sonores. Lorsque vous criez dans la direction d'un objet qui peut réfléchir le son de votre voix (dans un canyon ou dans une grotte par exemple), vous en entendez l'écho. Si vous connaissez la vitesse du son dans l'air, vous pouvez alors estimer la distance et la direction générale de l'objet. Le temps nécessaire à l'aller et au retour du son vers vous peut être converti en distance si vous connaissez sa vitesse.

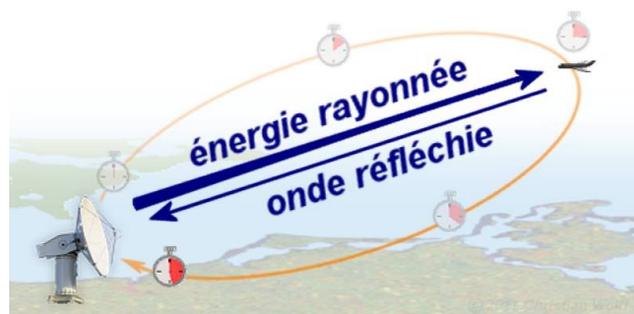


Figure 3: Principe de l'émission du radar

Le radar utilise des impulsions d'énergie électromagnétique à peu près de la même manière, comme le montre la Figure 3. Le signal hyperfréquence est émis en direction de la cible. Une petite partie de l'énergie transmise est réfléchi par la cible dans la direction du radar. Cette énergie renvoyée par la cible jusqu'au radar est appelée ECHO, exactement comme lorsque l'on considère les ondes sonores. Un radar utilise l'écho afin de déterminer la direction et la distance de l'objet qui a réfléchi son signal.

Le schéma ci-dessous illustre le principe de fonctionnement du radar primaire. Le signal transmis par le radar est généré par un émetteur puissant puis passe par un duplexeur qui l'aiguille vers l'antenne émettrice. Chaque cible réfléchit le signal en le dispersant dans un grand nombre de directions ce qui se nomme la diffusion. La rétrodiffusion est le terme désignant la partie du signal réfléchi diffusée dans la direction opposée à celle des ondes incidentes (émises). L'écho ainsi réfléchi par la cible vers l'antenne sera aiguillé par le duplexeur vers un récepteur très sensible.

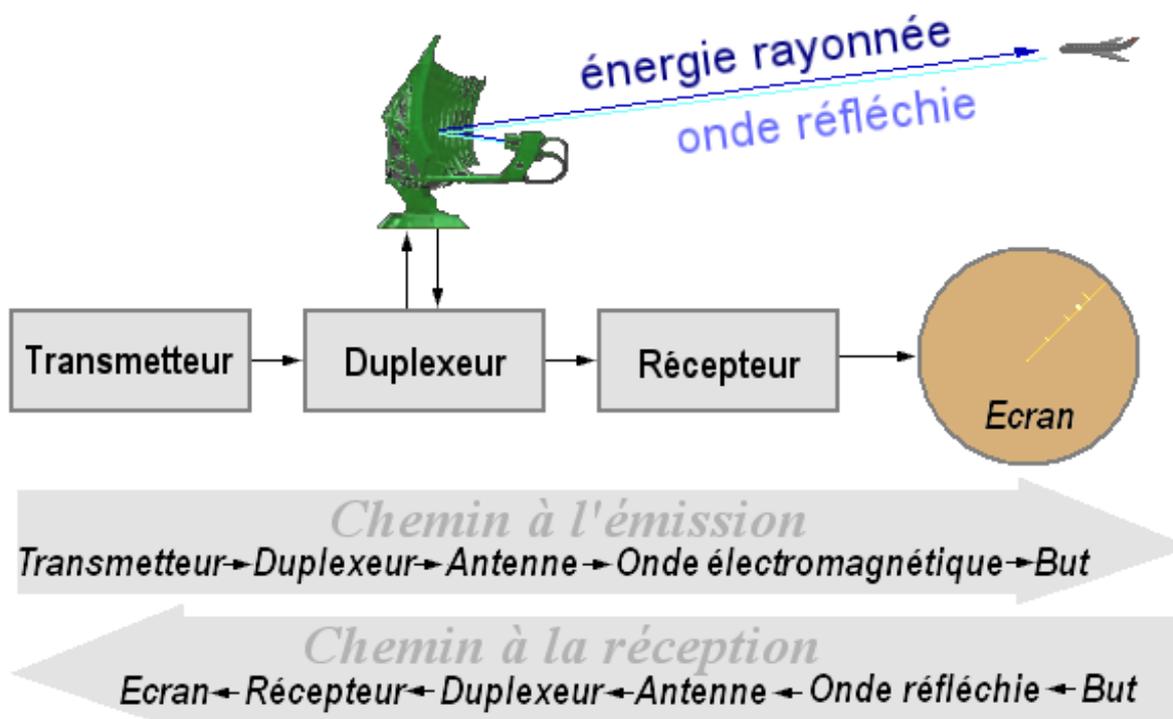


Figure 4 : Schéma du parcours de l'onde dans du radar primaire

Les échos détectés par le radar peuvent être finalement visualisés sur l'écran traditionnel de type PPI (*plan position indicator*) ou sur tout autre système de visualisation plus élaboré. L'écran type PPI permet de visualiser un vecteur dont l'origine est la position actuelle du radar et la direction

l'axe de l'antenne. Ce vecteur fait le tour de l'écran à la vitesse de rotation de l'antenne, et la position de l'axe de l'antenne au moment où un écho est détecté correspond donc à la direction dans laquelle se trouve cet écho.

Le principe de base du fonctionnement d'un radar primaire est donc très simple à comprendre, bien que la théorie puisse être assez complexe. Sa connaissance est cependant indispensable à la définition exacte et à l'utilisation de tout système radar. La réalisation et la mise en œuvre de radars primaires recourent à un large éventail de disciplines dans des domaines variés tels que le bâtiment, la mécanique, l'électricité, l'électronique, les micro-ondes de forte puissance (MFP), le traitement du signal et le traitement rapide de grands volumes de données numériques. Pourtant, quelques lois physiques sont de la plus grande importance.

La mesure de la distance par un radar est possible du fait des propriétés de l'énergie électromagnétique:

- Cette énergie circule normalement dans l'espace **en ligne droite et à vitesse constante**. Elle peut être soumise à des variations minimales dues aux conditions météorologiques et atmosphériques. Les effets de l'atmosphère et de la météo sur la propagation des ondes électromagnétique seront évoqués plus loin. Cependant, lors de la discussion sur la mesure de distance, ces effets seront temporairement ignorés.
- L'énergie électromagnétique se déplace dans l'air approximativement à la **vitesse de la lumière** soit :
  - 300 000 kilomètres par seconde ou
  - 186 000 miles (anglo-saxons) par seconde ou
  - 162 000 milles nautiques par seconde.
- **Réflexion des ondes électromagnétiques** Les ondes électromagnétiques sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent une surface conductrice. Si après l'émission d'un signal, on est capable de recevoir une partie de son énergie qui retourne vers la source, alors on a la preuve qu'un obstacle se trouve dans la direction de sa propagation.

## Classification des systèmes radars

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:

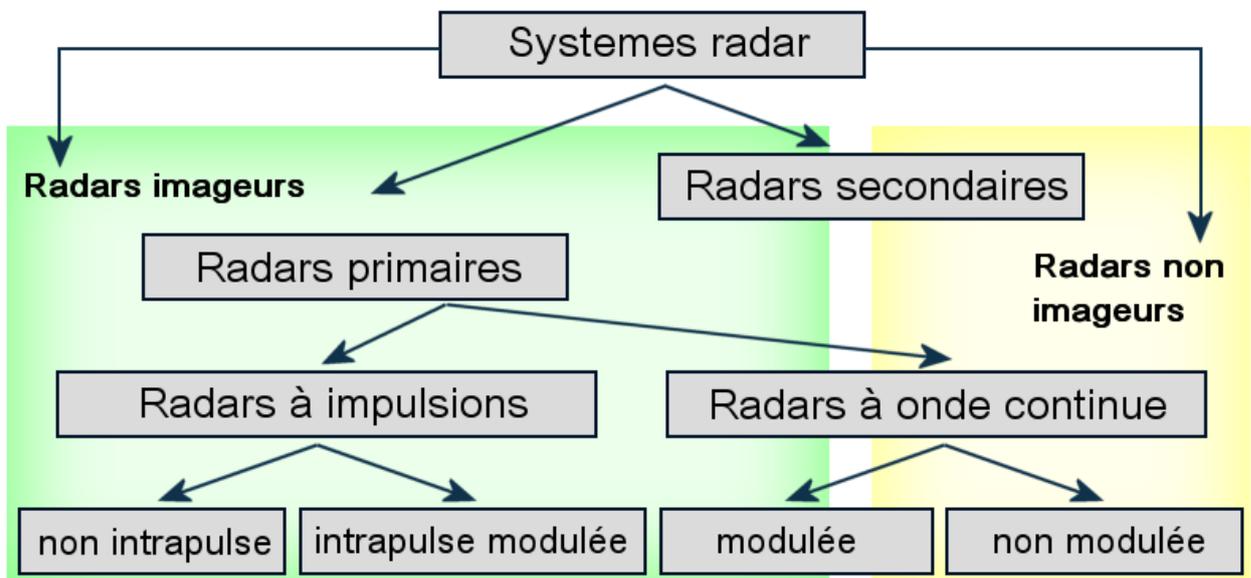


Figure 5: Organigramme des systèmes radar

## **Radars imageurs / Radars non imageurs**

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 radio altimètres. 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.

## **Radars primaires**

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.

## **Radars secondaires**

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).

## **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.

## **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.

## **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). Des équipements plus récents (LIDAR) fonctionnent dans la bande de fréquence des lasers et permettent d'autres mesures que celle de la vitesse.

## **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.

### 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).

## Composantes principales

### Le transmetteur

Le transmetteur est un appareil électronique qui génère une impulsion électromagnétique de la gamme des ondes radio qui sera envoyée à l'antenne pour diffusion. Il doit pouvoir:

- Produire l'onde de radiofréquence à une puissance moyenne et de pointe désirée;
- Émettre des ondes sur une gamme de fréquences;
- Émettre de façon stable la ou les fréquences désirées afin de permettre un traitement reproductible des données ;
- Être modulable en fréquence ou en phase pour les besoins de la formation de l'impulsion;
- Être fiable, facile à entretenir et efficace pour une très longue durée de vie.

Le transmetteur radar est construit en tenant compte des appareils qu'il alimente et ce chapitre décrira ceux-ci. Les types principaux de transmetteurs sont:

- Les oscillateurs de puissance: un tube à vide ou une cavité résonnante, habituellement un magnétron, génère une impulsion de radiofréquence lorsqu'il est excité par un générateur de décharges de puissance de courant continu appelé modulateur. Ce type est utilisé dans les radars non-cohérents ou pseudo-cohérents (la cohérence étant la possibilité de toujours émettre des impulsions de même phase);
- Les amplificateurs de puissance: un générateur d'onde envoie une impulsion à un amplificateur de puissance comme un amplifon, un klystron ou un amplificateur à semi-conducteurs. Les radars utilisant ce type sont la plupart du temps cohérents et plus récents. Un cas spécial est celui des antennes réseau actives où chaque élément radiateur ou chaque groupe d'éléments possède son propre transmetteur;



Figure 6: Transmetteur à oscillateur de puissance d'un radar russe P-37 (code OTAN «Bar Lock»)

### L'antenne

L'antenne est une des parties les plus importantes d'un radar. Elle réalise les fonctions essentielles suivantes:

- Elle transfère la puissance de l'émetteur à des signaux dans l'espace avec l'efficacité voulue et la selon la répartition nécessaire. Le même processus est appliqué à la réception.
- Elle permet d'obtenir le diagramme de rayonnement souhaité. En général il sera suffisamment étroit dans le plan horizontal pour obtenir la précision et la résolution demandée en azimut.

### Patron d'émission d'une antenne parabolique

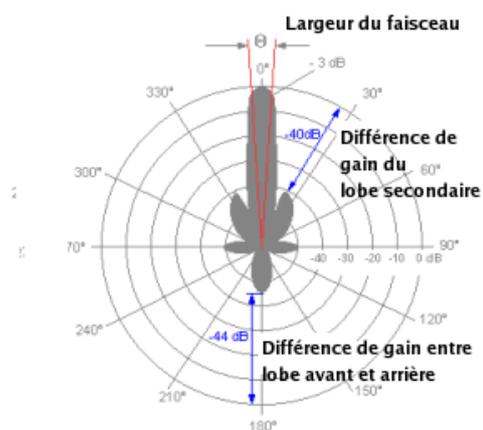


Figure 7 : Diagramme d'émission d'une antenne en coordonnées polaires

- Elle doit assurer la mise à jour de la position de la cible à la fréquence voulue. Dans le cas d'une antenne à balayage mécanique, cette mise à jour se fera au rythme de la rotation de l'antenne. Une vitesse de rotation élevée peut poser des problèmes mécaniques importants, notamment pour les équipements qui émettent dans des bandes de fréquences nécessitant l'utilisation d'antennes imposantes et pouvant peser plusieurs tonnes.
- Elle doit mesurer sa direction de pointage avec une grande précision.

### Diagramme d'émission

La plupart des systèmes radiants ont des directions privilégiées d'émission, ils sont **anisotropes**. Il est habituel de mesurer l'émission autour d'une antenne c'est ce qui s'appelle le **diagramme d'émission**. La position des maxima et des minima dépend du type d'antenne et de ses caractéristiques particulières.

Il s'agit donc d'un diagramme énergie versus l'angle d'azimut ou d'élévation qui peut être affiché sur différents type de graphiques. La façon la plus courante est d'utiliser un graphique en coordonnées polaires comme sur la Figure 7.

L'antenne est le point central et l'intensité autour de ce point, selon l'angle de visée, est indiquée par les cercles concentriques. L'intensité est normalisée, c'est-à-dire que l'énergie pointée dans une direction donnée est le rapport de l'énergie dans cette direction à celle dans la direction d'émission maximale, appelée axe du lobe principal. Dans la Figure 7, ce lobe est dans l'angle zéro degré, habituellement utilisé pour indiquer le Nord.

### Gain d'antenne

Le gain est le rapport entre l'énergie irradiée dans une direction particulière et l'énergie totale émise par l'antenne dans toutes les directions. Il s'agit donc du taux de concentration de l'énergie dans une direction donnée par rapport celui d'une antenne isotrope. Plus l'antenne est directionnelle, plus le gain est grand. Le gain s'applique également à la réception et a la même valeur.

Il est important d'utiliser les termes exacts, voici donc quelques définitions:

### Lobe principal et lobes secondaires

Le diagramme montré sur les deux figures comporte plusieurs pics appelés lobes. L'énergie émise dans un de ces lobes est très supérieure à celle dans les autres directions. Il s'agit du *lobe principal*. Les autres sont appelés les *lobes secondaires* ou *lobes mineurs*. Certaines antennes ont plusieurs lobes principaux, par exemple les antennes pour la télévision qui sont conçues pour émettre vers les zones plus peuplées d'une région. D'autres antennes n'ont qu'un seul lobe principal, c'est le cas des antennes radar qui sont hautement directionnelles.

Les *lobes secondaires* sont des pics d'émission dans des directions différentes de l'axe du faisceau principal. Habituellement, ceux-ci sont indésirables puisqu'ils utilisent une partie de l'énergie émise en pure perte. Il est impossible de les éliminer complètement mais ils peuvent être minimisés. L'intensité de ces lobes secondaires est une des caractéristiques importantes d'une antenne et elle est exprimée en décibels. Le lobe arrière est particulièrement important car il indique l'énergie transmise ou reçue de la direction opposée à l'axe du faisceau principal.

### Largeur du faisceau

La largeur du faisceau est défini comme la région angulaire de chaque côté de l'axe du lobe principal où l'énergie radiée est supérieure à la moitié de l'intensité dans l'axe maximal, ou  $-3$  dB en terme relatif. Cet angle est aussi appelé l'angle d'ouverture. Dans les deux graphiques, il est situé entre les lignes rouges. Comme on peut le voir, l'énergie émise n'est pas nulle quand on continue de chaque côté du lobe principal mais elle décroît rapidement.

La largeur du faisceau est mesuré tant selon l'azimut ( $\theta_{AZ}$  ou  $\varphi_{AZ}$ ) que l'élévation ( $\theta_{Él}$ ).

La largeur du faisceau peut ainsi être différente dans ces deux directions orthogonales.

### Rapport avant/arrière

Le rapport avant/arrière des lobes d'une antenne est le rapport entre l'énergie émise dans le lobe principal et la direction diamétralement opposée. Une grande valeur de ce rapport est désirable puisqu'elle indique qu'un minimum d'énergie est irradié vers l'arrière de l'antenne.

### Ouverture de l'antenne

La section efficace d'ouverture d'une antenne  $A_e$  est la surface en coupe que représente l'antenne en émission ou en réception. Il s'agit d'un paramètre crucial de la performance de l'antenne. Le gain ( $G$ ) est relié à l'ouverture par:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi K_a A}{\lambda^2} \quad (1)$$

$K_a$  = rapport d'efficacité d'ouverture

$A$  = surface de l'antenne

$A_e$  = section efficace d'ouverture de l'antenne

$\lambda$  = longueur d'onde

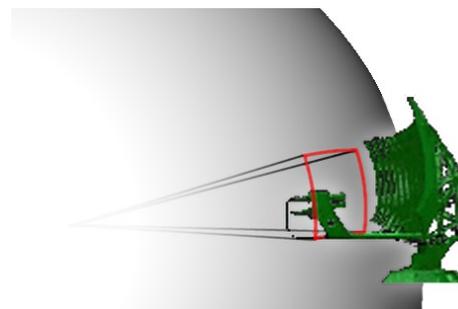


Figure 8: L'ouverture de l'antenne est la section utile de l'antenne par rapport à la sphère isotrope de réception

Le rapport d'efficacité dépend de la distribution d'énergie dans l'ouverture. Si la distribution est linéaire  $K_a = 1$  mais cela signifie un nombre important de lobes secondaires. En pratique, on veut limiter l'énergie émise dans ces lobes pour obtenir une plus grande directivité et donc  $K_a < 1$  ce qui donne  $A_e < A$ .

### Réflexions des ondes sur un sol plat

Le facteur représenté par une fonction trigonométrique traduit l'influence des réflexions sur la surface de la terre. Le sol, aux alentours immédiats de l'antenne d'un radar, a un impact important sur le diagramme de rayonnement vertical. A cause des combinaisons entre les ondes directes et les ondes réfléchies, les diagrammes de rayonnement de l'antenne changent à l'émission et à la réception. Ces effets sont notables dans la bande de fréquences VHF, mais diminuent lorsque la fréquence augmente. Pour détecter des cibles à basses altitudes, les réflexions sur le sol sont utiles. Ceci n'est possible que lorsque les ondulations de la surface dans la première ellipsoïde de Fresnel sont inférieures à  $0,001 R$  (c'est à dire, par exemple, que dans un rayon de 1000 m, aucun obstacle ne doit être de taille supérieure à 1 m!).

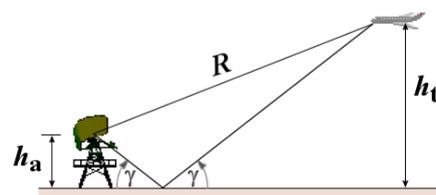


Figure 9 : Réflexions sur le sol

Les radars spécialisés émettant des ondes plus basses (bande VHF) utilisent les réflexions sur le sol et les lobes d'interférence afin d'optimiser la couverture en basse altitude. A des fréquences plus hautes, ces réflexions sont plus gênantes. Le schéma suivant montre le rayonnement en lobes généré par les réflexions sur le sol. Cet effet est habituellement indésirable puisqu'il permet à des avions de passer entre deux lobes sans être détectés. La technique a cependant été utilisée par des radars ATC terrestres (Contrôle de Trafic Aérien) afin d'en accroître la portée, mais cela n'est réalisable qu'à basse fréquence, quand la largeur des lobes est suffisante pour assurer la couverture radar nécessaire aux sites plus élevés.

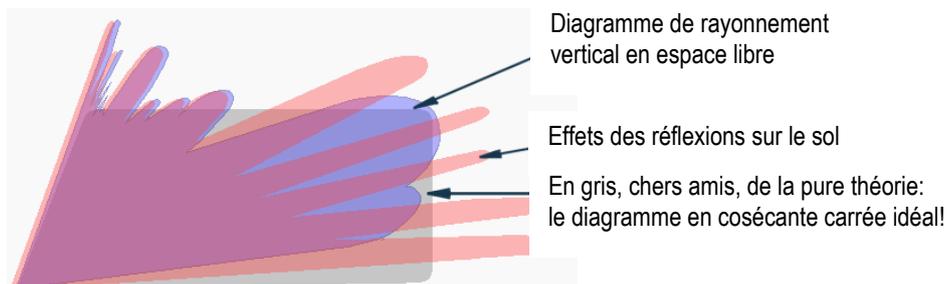


Figure 10 : Diagramme d'émission d'une antenne avec les réflexions des ondes sur un sol plat

Élever l'antenne augmente le nombre de lobes tout en les rendant plus fins. Dans une telle structure, les trous de détection entre les lobes sont partiellement comblés du fait des irrégularités du sol. En fait, si la surface du sol n'est pas très plate alors les effets de renforcement ou d'atténuation dus aux réflexions diminuent. Éviter les effets de lobes est une des préoccupations principales lorsqu'il s'agit de définir l'emplacement d'un radar et la hauteur de son antenne.

## Récepteur

Le récepteur reçoit les échos de retour qui ont été perçus par l'antenne. Il transforme le signal à haute fréquence du faisceau en un signal modulé de fréquence intermédiaire (FI) qui contient l'information des échos, l'amplifie et les transmet ensuite au système de traitement du circuit radar qui en retirera ensuite les cibles d'intérêt. Le récepteur idéal doit :

- Amplifier les signaux reçus sans y ajouter de bruit de fond ou distorsion;
- Optimiser la probabilité de détection de signaux grâce à une bande passante adaptée;
- Avoir une large plage d'intensités qu'il peut traiter sans saturation;
- Rejeter les signaux d'interférence pour optimiser l'extraction de l'information.



Figure 11 : Récepteur et générateur de signaux d'un radar ASR-E de contrôle aérien (Fabricant : EADS)

## Signal minimum détectable (SMD)

Le signal minimum détectable ( $P_{emin}$ ) pour un récepteur est une caractéristique importante car elle étermine la portée maximale du radar. Pour un récepteur typique, sa sensibilité est de l'ordre de  $10^{-13}$  Watts ( $-100$  dBm), qu'on nomme le signal minimum détectable (SMD).

Tous les récepteurs sont construits avec un SMD qui correspond aux conditions d'utilisations. Il n'est pas plus élevé que nécessaire car cela limiterait la bande passante de réception et demanderait de traiter des signaux faibles qui ne sont pas significatifs. En général, plus le seuil minimal de SMD est élevé, plus bas sera le taux de fausses alarmes dans la détection de cibles mais cela limitera l'extraction de vrais signaux du bruit de fond.

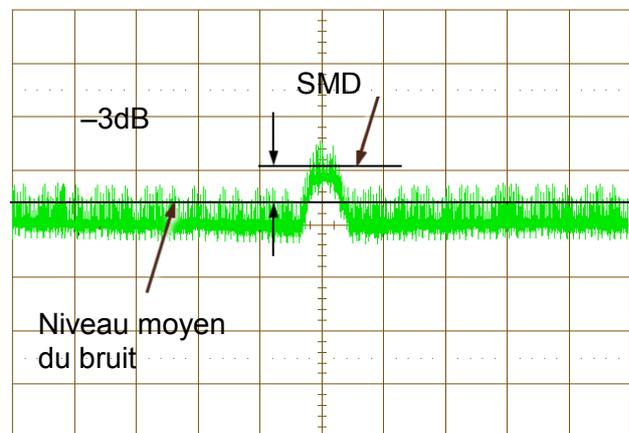


Figure 12 : Bruit blanc et un signal dépassant le SMD

## Bande passante

Un autre facteur très important est le bruit du récepteur. Chaque récepteur ajoute au signal qu'il traite un certain bruit interne qui ne peut être évité même par la meilleure conception. Ce bruit est en effet dû au mouvement brownien des électrons dans les composantes résistives, donc au bruit thermique, et il est proportionnel à la bande passante du récepteur.

La réduction de la bande passante permettrait de limiter le bruit thermique mais si elle est trop faible, le récepteur ne pourra amplifier et traiter de manière convenable le signal reçu. Comme compromis, la bande passante d'un radar pulsé est près de la réciproque de la largeur de l'impulsion. Par exemple, un radar utilisant une impulsion de  $1 \mu s$  ( $\tau$ ) aura une bande passante de  $1 \text{ MHz}$  ( $1/\tau$ )

## Gamme dynamique

Le récepteur doit amplifier l'écho de retour des cibles. Ce dernier varie grandement selon la nature de la cible et sa section efficace radar. La gamme dynamique correspond au rapport du signal mesurable maximal sur le signal mesurable minimal (le SMD). La limite supérieure fait habituellement référence à l'intensité de saturation et la limite inférieure au bruit.

Le récepteur doit donc avoir une gamme dynamique qui dépasse le plus intense des échos de retour possible. En pratique, cela veut dire qu'il doit s'étendre jusque dans les 80 dB car les échos les plus intenses proviennent:

- Des précipitations jusqu'à 55 dB ;
- Anges radar jusqu'à 70 dB ;
- Échos de mer jusqu'à 75 dB ;
- Échos de sol jusqu'à 90 dB.

## Interdépendances temporelles

Une grande partie des paramètres qui permettent d'opérer un radar sont reliés au temps et sont interdépendants. La plupart des radars émettent de courtes impulsions de longueur temporelle  $\tau$ , qui seront suivit d'un temps d'écoute. La figure montre que ce temps d'écoute est relativement long par rapport à la durée de l'impulsion.

Un synchronisateur envoie un signal à l'émetteur pour débiter le cycle émission-écoute et en même temps un autre signal au circuit de traitement des données. De cette façon, le délai entre l'émission de l'impulsion et les différents échos revenant des cibles pourra être interprété en distance au radar.

La fréquence de répétition des impulsions (FRI) est le nombre d'impulsions transmises par seconde. La période de répétition des impulsions (PRI) est le temps écoulé entre le début de deux impulsions successives. La relation entre ces deux notions est :

$$PRI = \frac{1}{FRI} \quad (2)$$

Les impulsions ne durent que quelques microsecondes et le temps d'écoute quelques millisecondes. Le radar

peut émettre ainsi des centaines ou même des milliers d'impulsions lorsqu'il effectue un balayage de l'horizon sur 360 degrés. Le nombre de rotation par minute, le temps d'éclairage, la portée maximale non ambiguë et le nombre maximal de coups au but vont tous dépendre du PRI. D'autres données lui seront également reliées comme la portée, la résolution en azimut et l'ambiguïté de vitesse.

Par exemple, un radar classique de contrôle aérien doit sonder sur 360 degrés en moins de 5 secondes pour répondre aux contraintes opérationnelles. Comme le traitement des données est fait en temps réel, introduisant un faible délai supplémentaire pour sonder le même azimut à chaque 5 secondes, le radar doit faire un peu plus que 12 révolutions par minute. En prenant une antenne parabolique ayant un faisceau de 1,6 degré de largeur, cela donne  $360^\circ / 1,6^\circ$  secteurs différents d'illumination, soit 225. Comme la rotation totale prend 5 secondes, un secteur est illuminé 5

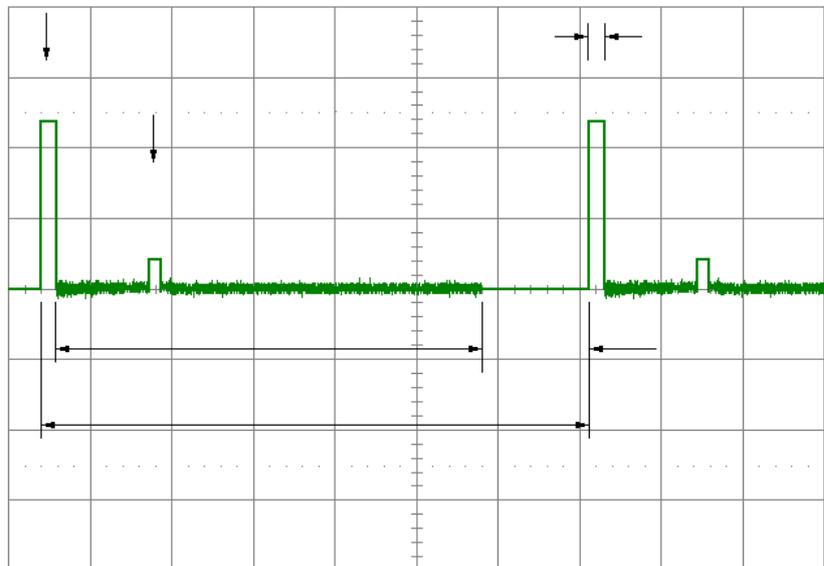


Figure 13 : Utilisation temporelle typique d'un cycle radar

secondes/225 secteurs, soit 22,22 millisecondes ce qui veut dire que le radar peut envoyer 22 impulsions de 0,8 microsecondes par secteur suivi chacune d'un temps d'écoute de 1 milliseconde ce qui donnera une portée de 120 km au radar.

Cet exemple démontre que toute variation dans le scénario temporel du sondage peut avoir des conséquences importantes. C'est pourquoi les radars utilisent généralement des paramètres prédéterminés pour maximiser la portée et la détection car même un petit changement du nombre de coups au but par secteur et par rotation, pour augmenter le temps de réception et donc la portée maximale non-ambigüe, aura des conséquences néfastes sur la probabilité of détection des cibles.

## L'équation du radar

L'équation du radar traduit l'influence de phénomènes physiques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde, et jusqu'à la réception du signal réfléchi (écho). L'équation du radar permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar.

Nous supposerons que les ondes électromagnétiques se propagent dans des conditions idéales, sans subir de quelconque perturbation. Lorsque l'énergie haute fréquence est rayonnée à partir d'une antenne isotrope, elle se propage de façon uniforme dans toutes les directions. Les zones d'égale densité de puissance forment donc des surfaces sphériques ( $A = 4\pi \cdot R^2$ ) concentriques autour de l'antenne.

Lorsque le rayon de la sphère augmente, une même quantité d'énergie est diffusée sur une plus surface sphérique. Cela revient à dire que la densité de puissance, dans une direction donnée, diminue lorsque la distance de l'émetteur augmente. La formule suivante permet de calculer la *densité de puissance pour un aérien omnidirectionnel*  $S_u$  :

$$S_u = \frac{P_s}{4\pi R_1^2} \quad (3)$$

$S$  = densité de puissance «omnidirectionnelle»  
 $P$  = puissance émise [W]  
 $R_1$  = distance antenne - cible [m]

Si l'antenne n'émet que sur une portion de la sphère (pour une puissance d'émission constante), la densité de puissance augmente dans la direction de l'émission. Cette caractéristique est appelée gain d'antenne. Ce gain est dû à la concentration de la puissance émise dans une seule direction. La formule permettant de calculer la densité de puissance dans la direction du gain maximum est la suivante:

$$S_g = S_u \cdot G \quad (4)$$

$S_g$  = densité de puissance «directive» [W/m<sup>2</sup>]  
 $S_u$  = densité de puissance «omnidirectionnelle» [W/m<sup>2</sup>]  
 $G$  = gain d'antenne

Évidemment, dans la réalité, les antennes de radars ne sont pas des antennes isotropes n'émettant que dans un secteur limité. Elles génèrent un lobe étroit et un gain pouvant aller jusqu'à 30 ou 40 dB. (ex. antenne parabolique ou antenne à réseau de phases).

La détection d'une cible ne dépend pas uniquement de la densité de puissance à sa position. Elle dépend également de la partie de l'énergie réfléchi par la cible qui est renvoyée vers l'antenne du radar. Afin de déterminer la valeur de cette puissance réfléchi «utile», il est nécessaire de connaître la surface équivalente radar  $\sigma$  de la cible. Cette valeur difficile à appréhender dépend de plusieurs paramètres.

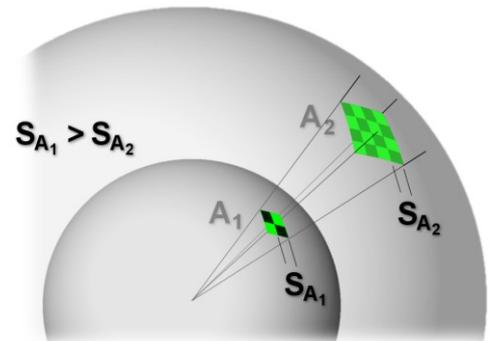


Figure 14 : Densité de puissance omnidirectionnelle

Dans un premier temps, il est relativement logique de considérer que plus la surface éclairée par le signal est grande, plus la puissance réfléchie est importante. Par exemple, un Jumbo jet présente une surface équivalente radar plus grande qu'un avion de tourisme dans la même configuration de vol. Au-delà des considérations de taille, la capacité d'un objet à réfléchir les ondes dépend de sa forme, de la composition de sa surface et de la nature des matériaux utilisés.

Reprenons donc toute notre démonstration: lorsqu'elle atteint sa destination finale, la *puissance réfléchie*  $P_r$  découle de la densité de puissance  $S_u$ , du gain d'antenne  $G$  et de la très fluctuante surface équivalente radar  $\sigma$ :

$$P_r = \frac{P_s}{4\pi R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \quad \text{en Watt} \quad (5)$$

$P_r$  = puissance réfléchie [W]  
 $P_s$  = puissance émise [W]  
 $R_1$  = Distance radar - cible [m]  
 $G$  = gain d'antenne  
 $\sigma$  = surface équivalente radar [m<sup>2</sup>]

D'une façon simplifiée nous pouvons considérer la cible comme un émetteur (du signal réfléchi). La puissance réfléchie  $P_r$  est donc assimilable à une puissance émise (par la cible).

Comme les conditions de propagation du signal sont identiques sur le trajet aller et sur le trajet retour, nous pouvons réutiliser la formule (4) pour déterminer la densité de puissance  $S_e$  atteignant l'emplacement de l'antenne du radar:

$$S_e = \frac{P_r}{4\pi R_2^2} \quad \text{en W/m}^2 \quad (6)$$

$P_r$  = puissance réfléchie [W]  
 $R_2$  = Distance cible - radar [m]  
 $S_e$  = densité de puissance au retour à l'antenne [W/m<sup>2</sup>]

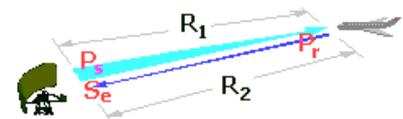


Figure 15 : Relation entre les puissances émises et réfléchies

L'énergie globale reçue par l'antenne  $P_e$ , c'est à dire la «quantité de densité de puissance» captée par l'antenne, dépend de la surface apparente de l'antenne  $A_W$ .

$$P_e = S_e \cdot A_W \quad (7)$$

$P_e$  = puissance [W]  
 $A_W$  = surface apparente de l'antenne [m<sup>2</sup>]  
 $S_e$  = densité de puissance au retour à l'antenne [W/m<sup>2</sup>]

La notion de surface apparente de l'antenne découle de ce qu'aucune antenne ne fonctionne sans perte (son efficacité n'est jamais de 100%). Dans la réalité, la surface «efficace» de l'antenne est donc toujours inférieure à sa surface géométriquement mesurée, et ce dans un facteur de 0,6 à 0,7 (facteur d'efficacité  $K_a$ ).

Nous pouvons donc définir la surface apparente par:

$$A_W = A \cdot K_a \quad (8)$$

$A_W$  = surface apparente de l'antenne [m<sup>2</sup>]  
 $A$  = surface réelle (géométrique) de l'antenne [m<sup>2</sup>]  
 $K_a$  = facteur d'efficacité

Le calcul de la puissance captée par l'antenne  $P_e$  peut donc s'effectuer ainsi :

$$\begin{aligned}
 P_e &= S_e \cdot A_w \\
 A_w &= A \cdot K_a \\
 P_e &= S_e \cdot A \cdot K_a \\
 S_e &= \frac{P_r}{4\pi R_2^2} \\
 P_e &= \frac{P_r}{4\pi R_2^2} \cdot A \cdot K_a
 \end{aligned} \tag{9}$$

Nous avons jusqu'à présent considéré séparément le trajet aller ( $R_1 =$  antenne - cible) et le trajet retour ( $R_2 =$  cible - antenne) du signal. Nous allons maintenant étendre l'équation au trajet global de l'onde en prenant les définitions des équations précédentes et en notant que  $R_1 = R_2$ , nous obtenons l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{P_r}{4\pi R_2^2} \cdot A \cdot K_a & P_r &= \frac{P_s}{4\pi R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \\
 P_e &= \frac{\frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{4\pi R_1^2}}{4\pi R_2^2} \cdot A \cdot K_a \\
 P_e &= \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2} \cdot A \cdot K_a & ; R_1 &= R_2 \\
 P_e &= \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \cdot R^4} \cdot A \cdot K_a
 \end{aligned} \tag{10}$$

Une formule supplémentaire (cependant elle ne sera pas expliquée ici) permet de déterminer le gain d'antenne  $G$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  du signal émis.

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A \cdot K_a \tag{11}$$

Si l'on en extrait l'expression de  $A \cdot K_a$ , et qu'on l'insère dans l'équation (10) ci-dessus, on obtient après simplification l'équation du radar:

$$P_e = \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad \text{en Watt} \tag{12}$$

## Distance maximale de détection

Après mise en forme nous pouvons exprimer la distance  $R$  sous la forme suivante:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{P_e \cdot (4\pi)^3}} \quad \text{en mètres} \quad (13)$$

Tous les paramètres qui influencent la propagation de l'onde émise par le radar ont été pris en compte dans cette équation théorique. Cependant, avant qu'elle soit réellement utilisable dans la pratique, par exemple pour déterminer l'efficacité d'un radar, il convient d'y apporter d'autres précisions.

Pour un radar donné, la plupart des grandeurs ( $P_s$ ,  $G$ ,  $\lambda$ ) peuvent être considérées comme des constantes puisqu'elles ne varient que dans des fourchettes très étroites. D'autre part, la surface équivalente radar variant énormément dans le temps, pour des raisons pratiques nous la poserons égale à  $1 \text{ m}^2$ .

Soit  $P_{Emin}$  la puissance minimum du signal autorisant sa détection par le radar. Tout signal de puissance inférieure ne peut être exploité puisqu'il est noyé dans le bruit du récepteur. Ce signal de puissance minimum  $P_{Emin}$  est donc celui qui permet au radar d'atteindre sa **portée maximum de détection**  $R_{max}$  comme indiqué par l'équation (13) ci-dessus.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{P_{e_{min}} \cdot (4\pi)^3}} \quad (14)$$

Les tubes n'ont pas tous exactement les mêmes qualités. Les tolérances limites acceptées lors de la production peuvent générer, d'un tube à l'autre, des variations de la puissance attendue, et donc de la portée théorique. Cette équation permet notamment de visualiser rapidement l'influence des caractéristiques d'un système radar sur sa portée de détection:

1. Le gain d'antenne ( $G$ ) et la longueur d'onde, la même antenne est utilisée à l'émission et à la réception, sont au carré sous une racine quatrième ce qui veut dire que la portée maximale est directement proportionnelle à la racine carrée de ces deux paramètres. En pratique, les antennes plus grandes nécessitent de plus longs câblages, les pertes le long de ces lignes et celles dues à l'utilisation d'une nouvelle antenne imparfaitement ajustée au système original privent jusqu'à la moitié de l'amélioration attendue.
2. Une diminution de la puissance minimum détectable ( $P_{Emin}$ ) par le récepteur se traduit par un allongement de la portée maximum du radar. Pour chaque récepteur il existe un niveau de puissance minimum à partir duquel il peut détecter un signal. Cette puissance minimum à partir de laquelle le récepteur peut fonctionner est appelée **Signal Minimum Détectable** (SMD). Les valeurs courantes de SMD s'échelonnent entre  $-104 \text{ dBm}$  et  $-110 \text{ dBm}$  ;
3. Les deux paramètres antérieurs sont des constantes pour un radar donné. Leur influence peut être calculé une fois pour toute. Par contre, la portée maximale dépend directement d'un variable changeante, soit la surface équivalente radar  $\sigma$  de la cible. Celle-ci peut varier grandement selon les dimensions de la cible et l'angle de vue par rapport au radar. Donc un radar a un  $R_{max}$  pour chaque type de cibles ou inversement, on peut calculer le  $\sigma$  minimal pour un  $R_{max}$ .

## Pertes

Lors de l'élaboration de notre équation du radar, nous avons considéré des conditions de propagations idéales, libres de toute perturbation. Cependant, dans la pratique, la propagation est affectée par de nombreuses pertes qui peuvent considérablement réduire l'efficacité du radar.

Nous allons donc pondérer notre équation d'un **facteur de pertes**  $L_{ges}$ .

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{P_{e_{\min}} \cdot (4\pi)^3 \cdot L_{ges}}} \quad (15)$$

Ce facteur regroupe les pertes suivantes:

- $L_D$  = atténuations internes dans les circuits à de l'émetteur et du récepteur
- $L_f$  = pertes dues aux fluctuations de la surface équivalente
- $L_{Atm}$  = pertes atmosphériques lors de la propagation de l'onde électromagnétique en direction de la cible (et sur le trajet retour).

Les composants hyperfréquences, tels les guides d'onde, les filtres, ou encore les radômes, génèrent des pertes «internes». Pour un radar donné, ces pertes sont relativement constantes et facilement mesurables. L'atténuation atmosphérique et les réflexions sur la surface de la terre sont d'autres problèmes qui affectent en permanence les performances des radars.

Composante	Symbole	Perte
Pertes atmosphériques	$L_a$	1,2 dB
Perte par la forme du faisceau	$L_{ant}$	1,3 dB
Facteur de largeur de faisceau	$L_B$	1,2 dB
Perte par adaptation du filtre	$L_n$	0,8 dB
Pertes par fluctuation (pour Pd=0.9)	$L_f$	8,4 dB
Perte d'intégration	$L_i$	3,2 dB
Pertes diverses dans le traitement du signal	$L_x$	3,0 dB
Pertes dans le guide d'onde du récepteur	$L_r$	1,0 dB
Pertes dans le guide d'onde de transmetteur	$L_t$	1,0 dB
<b>Pertes totales</b>	<b><math>L_{total}</math></b>	<b>21,1 dB</b>

Tableau 1 : Bilan typiques des pertes

## Influence du sol

Une forme plus complète (mais moins couramment utilisée) de l'équation du radar prend en compte des paramètres supplémentaires, comme l'influence des réflexions sur le sol, mais néglige la sensibilité du récepteur et les absorptions atmosphériques.

$$R_{\max} = K_{\alpha} \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot A_z \cdot t_i}{K \cdot T_0 \cdot n_R \cdot (4\pi)^3 \cdot d}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h_m}{\lambda} \cdot \sin \gamma\right) \cdot e^{-0,115\delta_R \cdot R_e} \quad (16)$$

$K_{\alpha}$  = facteur de dissipation remplace  $L_{ges}$ .  
 $T_i$  = longueur d'impulsion  
 $T_0$  = température absolue, en °K  
 $D$  = facteur de luminosité de l'écran  
 $\delta_R$  = facteur d'atténuations atmosphériques

$A_z$  = surface de réflexion apparente remplace  $\sigma$   
 $K$  = constante de Boltzmann  
 $n_R$  = bruit de fond du récepteur  
 $\gamma$  = angle du lobe réfléchi (par la surface de la terre)  
 $R_e$  = distance du corps absorbant (ex: nuages)

### Surface équivalente radar

La forme et la capacité de rétrodiffusion d'un signal radar par une cible est appelé sa surface équivalente radar ( $\sigma$ ). Il a pour unité les mètres carrés. Si toute l'énergie incidente du faisceau radar était diffusée de façon égale dans toutes les directions,  $\sigma$  serait alors la *section efficace* de la cible perpendiculaire au faisceau. En pratique, une partie de l'énergie est absorbée et la diffusion n'est pas isotrope. Donc, la surface équivalente radar est difficile à estimer et elle est généralement obtenue par une mesure *in situ*.

- La surface équivalente radar dépend de:
- La géométrie de l'aéronef et de ses appendices;
- La direction d'où provient le faisceau radar;
- La fréquence de transmission du radar;
- Le matériau composant l'appareil.

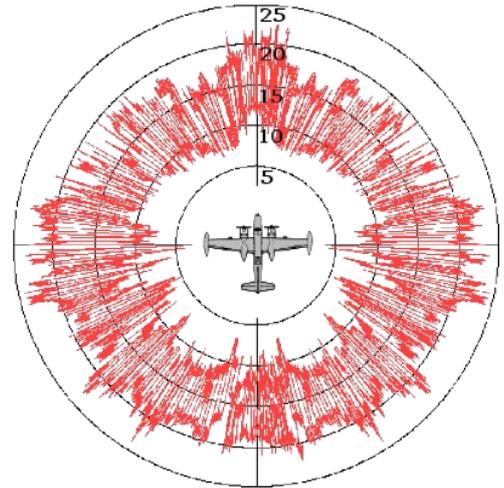


Figure 16: Diagramme de la surface équivalente radar expérimentale du bombardier B-26 à la fréquence 3 GHz<sup>1</sup>

L'utilisation de la technologie furtive pour minimiser la surface équivalente radar diminue la détection des appareils militaires. Mais elle dépend de la longueur d'onde des radars ennemis et elle n'a pas d'effets contre les radars VHF comme les radars P-12 et P-18, tous les deux utilisés par la défense aérienne serbe durant la guerre du Kosovo.

### Calcul de la surface équivalente radar

La surface équivalente radar (SER) est la mesure de la partie de l'énergie du faisceau qui sera rétrodiffusé vers le radar par rapport à l'énergie totale frappant la cible. Cette dernière agit théoriquement comme une sphère réémettant dans toutes les directions. Sa surface étant  $(4 \cdot \pi \cdot r^2)$ , la surface équivalente radar  $\sigma$  est donc définie comme:

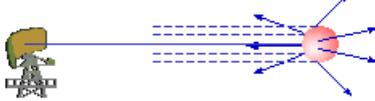
$$R_{\max} v_r < \frac{c_0^2}{8 f_{tx}} \tag{17}$$

- $S_r$  = énergie reçue par la cible à la distance  $r$ , en  $[W/m^2]$
- $S_t$  = énergie rétrodiffusée par la cible, en  $[W/m^2]$
- $r$  = diamètre de la cible
- $\sigma$  = capacité de la cible de rétrodiffuser vers le radar, en  $[m^2]$

La SER est donc le rapport entre l'énergie reflétée dans la direction du radar par une cible et celle d'une sphère lisse de  $1 \text{ m}^2$  émettant de manière égale dans toutes les directions.

### Exemples de SER

Le Tableau 2 montre l'équation de  $\sigma$  pour différentes formes quand la longueur d'onde utilisée se situe dans le domaine optique de la diffusion:

 <p>Signal rétrodiffusé par une sphère</p>	$\sigma_{\max} = \pi r^2$ <p>Où <math>r</math> est le rayon de la sphère</p>
 <p>Signal rétrodiffusé par un cylindre</p>	$\sigma_{\max} = \frac{2\pi r h^2}{\lambda}$ <p>Où <math>h</math> est la longueur du cylindre</p>

 <p>Signal rétrodiffusé par un une plaque perpendiculaire au faisceau</p>	$\sigma_{\max} = \frac{2\pi b^2 h^2}{\lambda}$ <p>Où b et h sont la longueur des côtés</p>
 <p>Signal rétrodiffusé par un une plaque faisant un angle avec le faisceau</p>	<p>Similaire à l'exemple précédent mais l'énergie est dirigée dans une direction totalement différente de celle du radar. Un radar monostatique ne peut recevoir d'énergie du tout. Seul un radar bistatique, dont l'émetteur et le récepteur ne sont pas co-localisés, pourraient en obtenir si le récepteur est dans l'angle de réflexion.</p>

Tableau 2 : SER pour différents types de cibles<sup>1</sup>

Cibles	oiseau	homme	bateau à cabines	automobile	camion	réflecteur en trièdre
SER [m <sup>2</sup> ]	0.01	1	10	100	200	20 379
SER [dB]	-20	0	10	20	23	43,1

Tableau 3 : Quelques exemples de SER ponctuelles<sup>2</sup>

Certaines cibles ont des valeurs de SER élevées à cause de leur diamètre et de leur orientation. Elles rétrodiffusent donc une grande portion de l'énergie incidente. Le Tableau 3 donne quelques exemples de SER pour un faisceau radar de bande X.

## Positionnement de la cible

### Calcul de la distance

Dans le cas d'un **radar à impulsions**, 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 à la vitesse de la lumière. En mesurant le temps « $t$ » écoulé entre le départ et le retour de l'impulsion au radar, il est donc possible de déterminer la distance  $R$  entre le radar et la cible. La formule permettant de calculer cette distance est donc la suivante :

$$R = \frac{c_0 \cdot t}{2} \tag{18}$$

$R$  = distance [m]

$t$  = temps mesuré [s]

$c_0$  = vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  m/s

La distance est dans ce cas exprimée en mètres. En divisant le résultat par 1 852, on obtient la distance en milles nautiques. La **distance (R)** est la distance en ligne droite entre le radar et la cible. Dans le cas de l'atmosphère, la trajectoire de l'onde radar est légèrement courbée par la

<sup>1</sup> Skolnik, M. (1980). Introduction to radar systems (Seconde ed.). McGraw-Hill Inc.

<sup>2</sup> Skolnik, p44.

variation de densité de l'air avec la hauteur, ce qui donne une distance parcourue légèrement plus longue que la réalité.

### Mesure de la direction

L'angle entre la direction du nord et celle de la cible (azimut) est déterminé grâce à la directivité de l'antenne. La directivité, parfois appelée «gain directif», est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction particulière. Une antenne à forte directivité est appelée «antenne directive». En mesurant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer non seulement l'azimut mais aussi le site de la cible (donc son altitude). La précision de la mesure de ces angles dépend de la

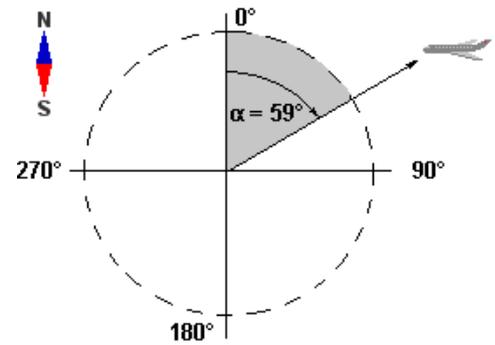


Figure 17: Azimut de la cible

directivité de l'antenne.

Pour une fréquence émise donnée, ou une longueur d'onde définie, la directivité d'une l'antenne est fonction de ses dimensions propres.

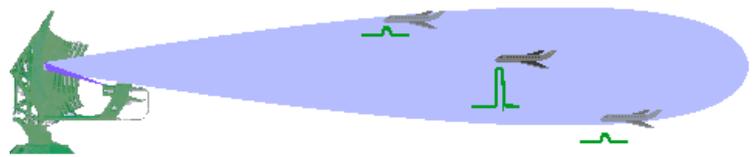


Figure 18: Détermination de l'azimut par rapport à la largeur du faisceau

Les radars émettent normalement de très hautes fréquences pour les raisons suivantes:

- propagation quasi rectiligne de ces ondes,
- haute résolution (plus la longueur d'onde est courte, plus le radar est capable de détecter un petit objet),
- encombrement réduit de l'antenne (plus on augmente la fréquence du signal rayonné, plus la directivité est grande pour une antenne de taille donnée).

L'azimut vrai 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.

Les antennes de la plupart des radars sont étudiées et réalisées de façon à rayonner l'énergie dans une direction donnée sous la forme d'un faisceau directionnel appelé «lobe principal». En général le balayage en azimut par ce lobe s'effectue par un simple mouvement de l'antenne.

A cause de la forme du lobe rayonné, la puissance du signal réfléchi varie au fur et à mesure de l'éclairage de la cible par le lobe. Elle atteint son amplitude maximum théoriquement lorsque la cible est exactement dans l'axe du faisceau. Les radars de conduite de tir et de guidage d'arme déterminent donc la position de la cible dans le faisceau pour que le signal réfléchi soit maximum. Ils réagissent ensuite de façon à conserver le calage de la cible dans la même position grâce à un système de poursuite manuel ou automatique.

Afin de déterminer précisément l'azimut de la cible, la position exacte du nord doit être connue. Par conséquent les équipements les plus anciens nécessitaient l'emploi d'une boussole ou l'aide de quelques calculs trigonométriques. Les radars modernes assurent directement cette tâche et, grâce au GPS, reçoivent une information extrêmement fiable concernant la direction du nord.

La transmission rapide et précise de l'information de direction de la cible (azimut) entre la plaque tournante supportant l'antenne et le scope radar peut être assurée par:

- des servo-systèmes ;
- un comptage d'impulsions d'horloge «azimut».

Les servo-systèmes sont utilisés sur les anciens équipements et fonctionnent grâce à des éléments tels que les transmetteurs et les récepteurs de téléaffichage. Sur les systèmes plus récents, un codeur synchronisé génère des tops durant la rotation de l'antenne. Le comptage de ces tops permet à tout instant de déterminer la position de l'antenne.

Les nouveaux radars balayent leur secteur de recherche sans mouvements mécaniques, ou avec des mouvements minimums. Ces radars mettent en œuvre un balayage électronique en azimut et/ou en élévation (antenne réseau à commande de phase).

## Angle de site et altitude

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.

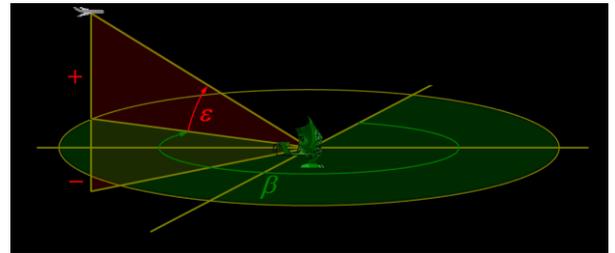


Figure 19: Angle de site  $\varepsilon$  et angle d'azimut  $\beta$

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 ( $\varepsilon$ ) 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.

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  $\varepsilon$ .

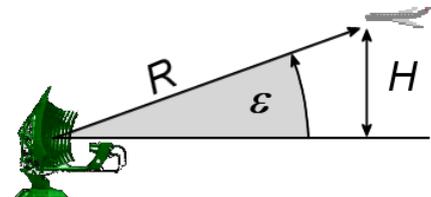


Figure 20: Relation trigonométrique simple entre l'élévation et la hauteur

On sait que  $\sin \alpha = \frac{\text{angle opposé}}{\text{Hypoténuse}}$  (19)

Nous insérons ces valeurs dans la formule pour trouver la hauteur géométrique de la cible :

$$H = R \cdot \sin \varepsilon \quad (20)$$

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. On peut déterminer l'équation à partir de la Figure 21. Un triangle est formé par les points: centre de la terre, position géographique du radar, et position de la cible (avion).

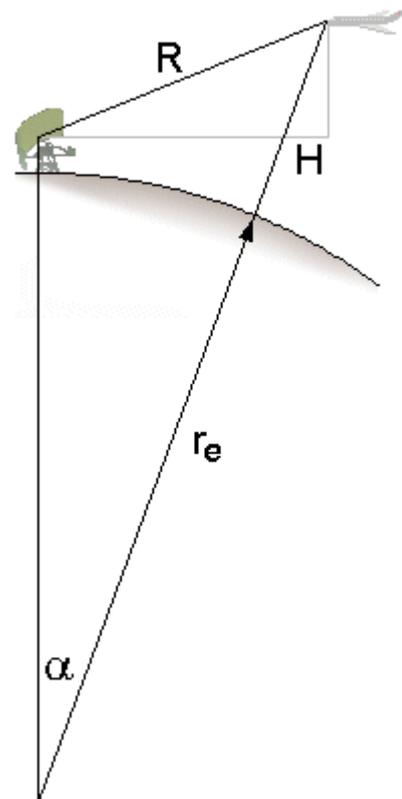


Figure 21: Relation entre l'altitude et la hauteur à l'étude de la terre courbe

$$H = R \cdot \sin \varepsilon + \frac{R^2}{2r_e} \quad (21)$$

$R$  = distance de la cible en ligne droite

$\varepsilon$  = angle de site mesuré

$r_e$  = rayon moyen de la terre (environ 6 370 km)

(Cette formule n'est qu'approximative!)

Les cotés du triangle sont ceux qui sont repris dans la formule du cosinus et donc dans l'équation devient:

$$R^2 = r_e^2 + (r_e + H)^2 - 2r_e(r_e + H) \cdot \cos \alpha \quad (22)$$

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  $\alpha$ :

$$360^\circ \cdot R_{topgr.} = \alpha \cdot 2\pi r_e \quad (23)$$

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 ( $R_A$ ) égal à  $4/3 \cdot r_e \approx 8\,500$  km et un terme est ajouté pour tenir compte des valeurs actuelles de température, d'humidité et de pression. A titre d'exemple, la formule suivante est utilisée pour déterminer l'altitude d'une cible par le radar d'altimétrie PRW-16 :

$$H = \underbrace{r \cdot \sin(\pm \varepsilon)}_{1.} + \underbrace{\frac{r^2}{2R_A}}_{2.} + \left\{ \underbrace{(4 + 0,67\Delta a) \cdot 10^{-7}}_{3.} \cdot \left[ \underbrace{0,8 - (292 - N) \cdot 5 \cdot 10^{-3}}_{4.} \right] \right\} r^2 \quad (24)$$

Avec comme termes :

1. altitude sans prendre en compte le rayon de la terre;
2. compensation du rayon de réfraction terrestre (environ 8 500 km);
3. compensation de la réfraction dans l'atmosphère;
4. influence de la température sur la réfraction.

## Vitesse radiale Doppler

Les radars modernes mesurent la vitesse de déplacement des cibles en utilisant l'effet Doppler-Fizeau. Ce dernier est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. On peut de manière alternative noter la différence de phase entre deux impulsions successives émises et retournées par les cibles.

Le décalage ne donne cependant que le déplacement par rapport au radar, soit la composante radiale de la cible. Les valeurs les plus grandes sont lorsque le radar «regarde» dans la même direction que le mouvement et les plus petites se trouvent dans les directions tangentielles à celui-ci. La valeur de la composante radiale Doppler est positive quand la cible s'approche du radar et négative quand elle s'en éloigne.

La vitesse radiale est obtenue par :

$$v_r = \frac{\lambda}{-4\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{f_D c_0}{2 f_{tx}} \quad (25)$$

$f_D$  = variation de fréquence Doppler

$f_{tx}$  = fréquence transmise

$c_0$  = vitesse de la lumière

$v_r$  = vitesse radiale de la cible

$d\varphi/dt$  = déphasage entre l'onde émise et retournée

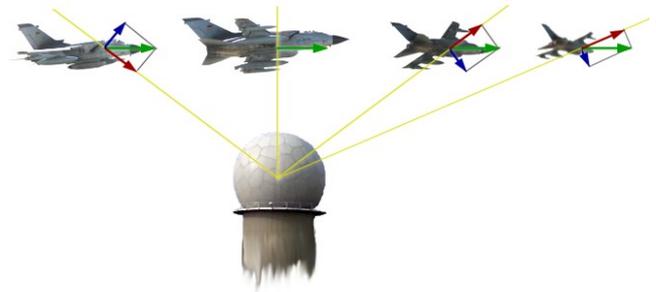


Figure 22: Explication de la vitesse radiale : *direction réelle*, *composante radiale*, *composante tangentielle*

### Application à l'aviation

Un avion est une cible ponctuelle. S'il se déplace le long d'une ligne droite, sa vitesse notée par un radar de surveillance sera la composante radiale de son déplacement, comme expliquée antérieurement.

La Figure 22 montre une telle situation. Le décalage de la fréquence Doppler sera positif à l'approche de l'avion, deviendra nul quand il passera à la perpendiculaire du radar et deviendra négatif par la suite. La variation de la valeur de sa vitesse sera égale au cosinus de l'angle entre l'avion et le faisceau radar :

- $\theta = 0^\circ$  donne vitesse maximale s'approchant
- $\theta = 90^\circ$  et  $270^\circ$  donne vitesse nulle
- $\theta = 180^\circ$  donne la vitesse maximale s'éloignant

Si un avion tourne en cercle autour du radar, sa vitesse sera toujours nulle car le radar ne voit pas la composante tangentielle.

### Application météorologique

Les précipitations se déplacent avec le vent et permettent d'obtenir des informations sur sa direction et sa vitesse grâce aux données Doppler. En air clair près du sol, le déplacement des insectes peut être aussi perçu par un radar météorologique et donner le déplacement des brises de mer et des fronts de rafales sortant des orages.

30 Dans un cas de pluie stratiforme, le sondage permettra d'obtenir la direction et la vitesse des vents à différentes altitudes, comme si on avait fait un radiosondage. En situation convective, il peut détecter des rotations dans les nuages qui peuvent être associées avec des tornades. Il peut également repérer des zones de convergence ou de divergence des vents près du sol associés avec de la forte turbulence.

La Figure 23 montre un dégradé de couleur proportionnel à la composante radiale de la vitesse de déplacement des gouttes de précipitations dans un cas réel simple. Le radar est placé au centre et par convention, le bleu/vert est utilisé pour les vitesses qui s'approchent, alors que le rouge pour celles qui s'éloignent. La ligne grise de gauche à droite montre la ligne de vitesses radiales nulles.



Figure 23: Affichage Doppler pour un radar météorologique : rouge pour la composante s'éloignant et vert pour celle s'approchant.

Ces exemples sont très simples, dans une situation réelle, le vent peut varier d'un endroit à l'autre et l'image demandera un examen plus détaillé. Cependant, en se rappelant que l'on a la composante radiale en tout point, un utilisateur peut obtenir beaucoup d'information météorologique.

## Résolution

La résolution d'un radar est sa capacité à distinguer deux cibles très proches l'une de l'autre, en azimut ou en distance. Les radars de contrôle d'armes, qui demandent une grande précision, doivent être capables de distinguer des cibles espacées de quelques mètres. Résolution et précision ne doivent pas être confondues. La précision est le degré de correspondance entre la position et/ou la vitesse de la cible mesurée par le radar à un instant  $t$  et la position et/ou la vitesse réelle de cette même cible au même instant.

Les radars de veille, généralement moins précis, ne peuvent faire de distinction qu'entre des cibles espacées de quelques centaines, voire même milliers, de mètres. Les radars météorologiques ne repèrent pas des cibles individuelles mais plutôt obtiennent le retour de toutes les précipitations dans un volume sondé ce qui donne une moyenne des intensités dans ce volume.

La résolution est traditionnellement divisée en deux parties: la résolution en distance et la résolution angulaire (en azimut).

### Cellule de résolution

Les résolutions en distance et angulaire conduisent à la notion de cellule de résolution. Le sens de cette cellule est très clair: à moins qu'il soit possible d'exploiter un éventuel effet Doppler, il est impossible de distinguer (l'une de l'autre) deux cibles se trouvant à l'intérieur d'une même cellule de résolution.

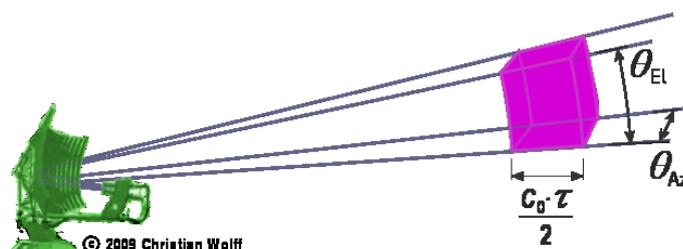


Figure 24: La cellule de résolution

On considère généralement que le volume de l'impulsion est fixé par l'angle d'ouverture  $u$  (angle d'un côté à l'autre du lobe principal du faisceau où la puissance émise diminue de moitié ou  $-3$  dB en terme relatif) et par la résolution en distance  $\Delta R$  correspondant à  $\Delta t$  de la longueur de l'impulsion  $\tau$ . Donc,  $\Delta R = c\tau/2$ . (C'est à dire la durée du signal à la sortie des circuits de compression d'impulsion, tel qu'il a été obtenu par modulation interne).

Plus le spectre de l'impulsion émise est large et l'angle d'ouverture étroit, plus la cellule de résolution est petite et plus l'équipement radar est protégé des interférences.

### Résolution en distance

La résolution en distance est la capacité d'un système radar à distinguer deux ou plusieurs cibles situées dans la même direction mais à des distances différentes. La qualité de la résolution dépend de la largeur de l'impulsion émise, du type et de la taille des cibles, et de l'efficacité du récepteur et de l'indicateur.

La largeur d'impulsion est le paramètre prépondérant pour la résolution en distance. Un système radar bien conçu, en considérant que tous les autres facteurs permettent une efficacité maximale, devrait être capable de distinguer des cibles espacées d'un temps égal à une demi-largeur d'impulsion  $\tau$ . En conséquence, la résolution en distance théorique d'un radar peut être calculée grâce à la formule suivante:

$$S_r \geq \frac{c_0 \cdot t}{2}$$

(26)

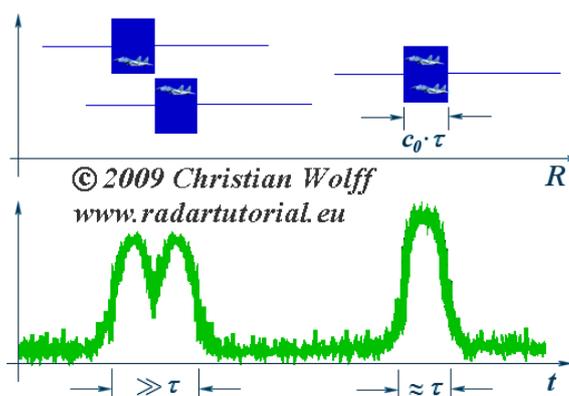


Figure 25: La résolution d'un radar

Ainsi, dans la Figure 26, l'impulsion a 30 mètre de longueur et son front sera retourné par le second avion alors qu'elle illumine encore le premier avion qui ne le précède que de seulement 100 mètres. Les deux retours seront donc enchevêtrés lors de la réception au radar et il sera impossible de les distinguer. Dans la Figure 27, le front de l'impulsion frappe le second avion alors que le premier avion a déjà été illuminé par les 2/3 de celle-ci. Lorsque le retour du front d'impulsion par le second avion arrive au niveau du premier avion, toute l'impulsion a déjà été retournée vers le radar par ce dernier depuis 100 mètres. Les deux échos seront donc clairement séparés par le récepteur du radar.

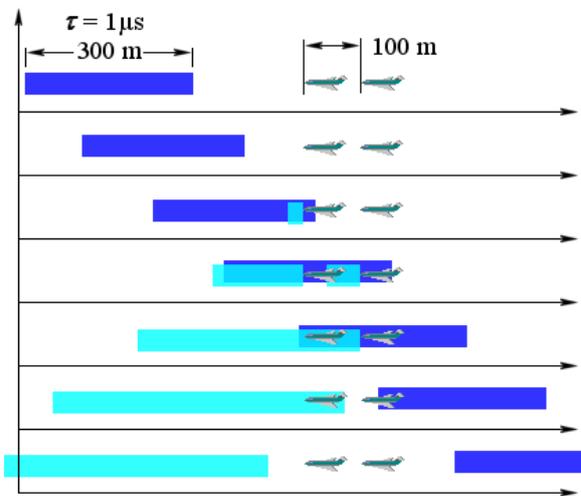


Figure 26: Deux cibles pas assez espacées

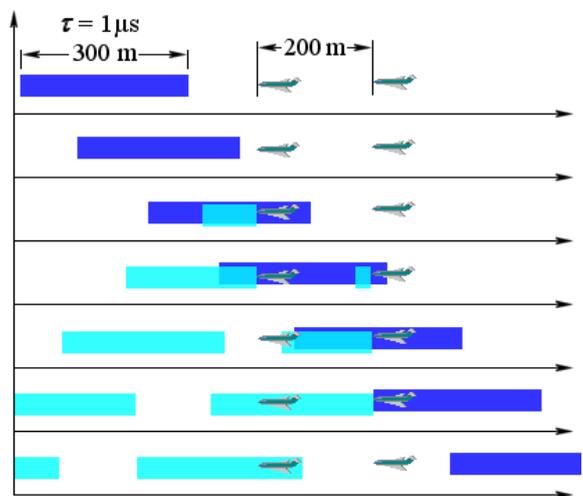


Figure 27: Un espace suffisant

## Résolution angulaire

La résolution angulaire est l'écart angulaire minimum qui permet au radar de distinguer deux cibles identiques se présentant à la même distance. La résolution angulaire d'un radar est déterminée par la largeur de son lobe d'antenne, elle-même définie d'après son angle à -3 dB (largeur du lobe à mi-puissance).

Les points du diagramme de rayonnement de l'antenne qui reçoivent la moitié de la puissance émise (c'est à dire la largeur du lobe à -3 dB) sont considérés comme les limites du lobe lorsque l'on calcule la résolution angulaire; deux cibles identiques, à la même distance, sont de fait vues par un radar à des azimuts différents lorsqu'elles sont espacées angulairement d'une valeur supérieure à la largeur du lobe à -3 dB.

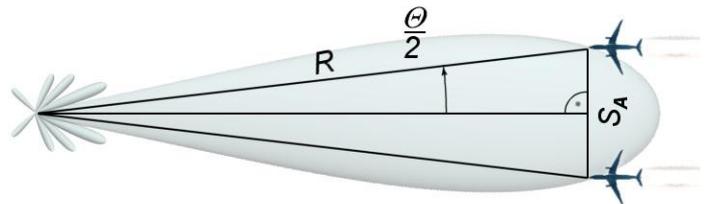


Figure 28: La résolution angulaire

Une remarque importante s'impose immédiatement: plus le lobe est étroit, plus la directivité de l'antenne est importante. La résolution angulaire rapportée à une distance entre deux cibles peut être calculée par la formule suivante:

$$S_A \geq 2R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (27)$$

$\theta$  = largeur du lobe d'antenne (Thêta)

$S_A$  = résolution angulaire rapportée à une distance entre deux cibles

$R$  = distance oblique antenne - cible [m]

La résolution angulaire de cibles sur un écran PPI analogique, en termes pratiques, dépend de la faculté de l'opérateur de distinguer deux échos plus ou moins confondus. Les systèmes offrant une option de reconnaissance de cible peuvent améliorer leur résolution angulaire, grâce à leur capacité de comparer l'amplitude des impulsions réfléchies par chaque cible individuellement.

## Ambiguïtés

### Ambiguïté distance

La distance maximum  $R_{max}$  mesurable par un radar n'est pas seulement limitée par le résultat de l'équation du radar, mais aussi par la durée du temps qui sépare l'émission de deux impulsions consécutives.

La formule de la distance maximum que peut résoudre sans ambiguïté le radar est relié au taux de répétition des impulsions émises qui se déplacent à  $c_0$  (vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  m/s) peut être déterminée par la formule :

$$R_{\text{max non ambigu}} = \frac{c_0 (\text{PRI} - \text{DI})}{2} \quad (28)$$

L'insertion de la durée d'impulsion (DI) dans cette formule traduit le fait que l'impulsion reçue par le radar (écho) doit être complète.

Ce qui donne en kilomètres avec une impulsion ayant une durée de l'ordre des microsecondes:

$$R_{\text{max non ambigu}} = \frac{\text{PRI} - \text{DI} [\mu\text{s}]}{6,66 \mu\text{s}} \quad \text{en km} \quad (29)$$

La période de répétition des impulsions (PRI) du radar est donc un paramètre important dans le calcul de la distance maximum de détection car les échos qui reviennent au radar après un temps supérieur à la PRI apparaissent à l'écran à des positions erronées (distances fausses). Ils sont alors appelés échos de 2ème balayage (ou de  $n^{\text{ème}}$  balayage).

L'horloge du radar est remise à zéro à chaque fois qu'une nouvelle impulsion est émise ( $T_0$ ), et ce afin de s'assurer que la mesure de distance s'effectue bien à partir de la dernière impulsion. Les échos reçus dans un délai supérieur à la période de répétition des impulsions (PRI) subissent l'un des deux traitements suivants:

- S'ils arrivent pendant le temps d'émission d'une impulsion, ils sont rejetés (accès impossible aux circuits de réception)
- S'ils sont reçus pendant l'intervalle entre 2 impulsions, alors ils génèrent des erreurs de calcul de la distance (échos de  $n^{\text{ème}}$  balayage).

Comme la fréquence de répétition des impulsions ( $\text{FRI} = 1/\text{PRI}$ ) détermine la distance maximum pouvant être visualisée. En utilisant une PRI qui n'est pas toujours la même, dite décalée («staggered» en anglais), le  $R_{max}$  entre chaque impulsion change. L'écho qui revient au-delà de  $R_{max}$  changera de position sur un affichage tel que la Figure 29. Par contre les échos à l'intérieur de  $R_{max}$  seront toujours positionnés au même endroit.

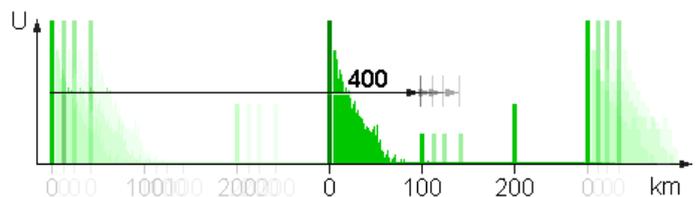


Figure 29: Un écho de deuxième balayage n'a plus de position stable sur l'affichage lorsque la PRI est variable.

Visualisé sur un affiche PPI, il n'apparaîtra plus sous la forme d'un petit arc de cercle à une position stable mais comme un amas de points puisque le temps de réception change entre chaque impulsion émise (la distance ambiguë calculée est alors légèrement différente d'une impulsion à l'autre). La Figure 30 montre un écho normal et sa réponse IFF (arcs de cercle), ainsi qu'une réponse IFF de deuxième balayage (petits points), en utilisant une PRI variable.



Figure 30: Un écho non ambigu (avec une réponse IFF) et un IFF «ambiguë» obtenus avec une PRI variable.

On remarque également que l'interrogateur n'utilise pas toutes les impulsions de synchronisation. (L'apparition de trop nombreux IFF «ambiguës» peut être contrôlée par la limitation de la puissance d'émission de l'interrogateur.)

Grâce à cette particularité, un traitement du signal informatisé peut calculer la distance correcte. Les radars 3D plus récents utilisant des antennes à réseau de phases (tels le RRP-117) n'ont pas ce problème d'ambiguïté distance. Le calculateur du système détermine une direction de pointage (et une distance de détection) propre à chaque faisceau selon un programme établi.

### 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. Pour la détection, il est nécessaire que l'impulsion émise ait entièrement quitté l'antenne et que le radar ait remis en fonction son récepteur ( $T_{MES}$  = temps de mise en service du récepteur). La distance minimum  $R_{min}$  («distance aveugle») est donc la distance minimum à laquelle doit se trouver une cible pour pouvoir être détectée.

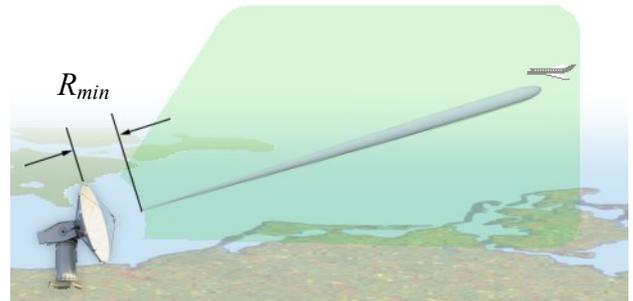


Figure 31: Distance aveugle

Le temps de transmission doit être le plus court possible si l'on veut détecter des objets très proches.

$$R_{min} = \frac{c_0 (DI + T_{MES})}{2} \quad (30)$$

Les cibles situées à une distance inférieure à la durée d'impulsion ne sont pas détectées. Une impulsion DI de 1  $\mu s$  (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.

### Dilemme Doppler (ambiguïté Doppler)

Dans un radar à impulsions, la modulation de l'onde porteuse est une suite d'ondes carrées à la fréquence de répétition des impulsions ( $f_{PRI}$ ). Une analyse spectrale du signal ressemble à un peigne, comme dans la Figure 32, dont les dents se répètent à la fréquence  $f_{PRI}$ . Il est impossible de séparer ces harmoniques par leur intensité.

À la réception de l'écho de retour, qui peut avoir été modifié par le déplacement de la cible selon l'effet Doppler-Fizeau, le spectre de fréquences ne peut être utilisé que dans une harmonique. Cela veut dire que la différence entre la fréquence entre le signal original et celui du retour ne peut être décalée que de moins de  $f_{FRI}$ .

En utilisant l'équation générale de la fréquence Doppler, la vitesse radiale maximale non ambiguë ( $v_r$ ) peut être calculée par:

$$f_{FRI} < |f_D| = \frac{2v_r \cdot f_{tx}}{c_0} \quad (31)$$

$$v_r < \frac{c_0 f_{FRI}}{2f_{tx}} \quad (32)$$

$f_D$  = la différence de fréquence Doppler;  
 $f_{tx}$  = la fréquence transmise;  
 $c_0$  = la vitesse de la lumière dans le milieu.

Cette équation n'est valide que si le sens du décalage Doppler est connu: s'approchant ou s'éloignant du radar. S'il est inconnu, la vitesse non ambiguë est la moitié:

$$v_r < \frac{c_0 f_{FRI}}{4f_{tx}} \quad (33)$$

D'autre part, la portée maximale non ambiguë d'un radar est inverse à la fréquence de répétitions des impulsions, plus le temps d'écoute est long plus la portée est grande:

$$R_{\max} < \frac{c_0}{2f_{FRI}} \quad (34)$$

En multipliant l'équation (32) par l'équation (33), on trouve une constante qui ne dépend que de la fréquence de transmission du radar:

$$R_{\max} v_r < \frac{c_0^2}{8f_{tx}} \quad (35)$$

La variation de la fréquence de répétition des impulsions a donc un effet inverse sur la portée et la vitesse maximale non ambiguës: si on augmente  $f_{FRI}$ , la vitesse non ambiguë augmente mais la portée diminue, et vice-versa si on diminue  $f_{FRI}$ . C'est ce qu'on appelle le «dilemme Doppler».

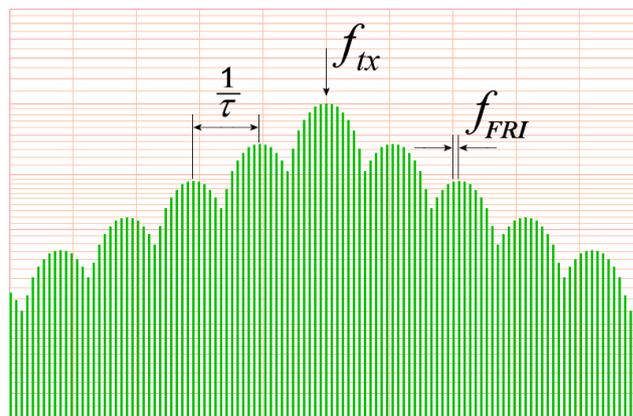


Figure 32: Analyse en fréquences d'un signal radar.