

CHAPITRE 7

ÉQUATION DE PROPAGATION DU RADAR

1	INTRODUCTION	2
2	RAPPEL DU ROLE DE L'ANTENNE RADAR.....	2
2.1	ROLE DE L'ANTENNE A L'EMISSION – NOTION DE GAIN.....	2
2.2	ROLE DE L'ANTENNE A LA RECEPTION, NOTION DE SURFACE EFFECTIVE.....	3
3	REFLEXION DES ONDES PAR UNE CIBLE NOTION DE SURFACE EQUIVALENTE.....	4
4	EQUATION DE PROPAGATION	5
5	APPLICATION PRATIQUE DE L'EQUATION DE PROPAGATION.....	6
6	ORDRE DE GRANDEUR DES SIGNAUX PERÇUS PAR LES RADARS	9
7	EXPOSE DU PROBLEME RADAR – CONCLUSIONS	10

1 INTRODUCTION

Le problème de la portée d'un radar est a priori celui de la réception de signaux très faibles. En effet, plus la cible est lointaine plus la proportion d'énergie qui vient l'illuminer est faible et les phénomènes de propagation étant réversibles, d'autant moins forte sera celle captée par le radar en retour.

Nous allons calculer cette énergie de retour, en fonction des paramètres liés à la cible et au radar, pour aboutir à l'équation de propagation du radar.

Auparavant, il est bon de préciser le rôle dans la transmission de l'énergie de l'antenne et de la cible.

2 RAPPEL DU ROLE DE L'ANTENNE RADAR

L'antenne a pour but de répartir l'énergie fournie par l'émetteur dans le domaine d'espace à observer, et de capter l'énergie de retour. Nous allons successivement examiner ces deux modes de fonctionnement.

2.1 ROLE DE L'ANTENNE A L'EMISSION – NOTION DE GAIN

A l'émission, l'antenne n'envoie de l'énergie que dans un secteur limité de l'espace, il y a donc concentration de l'énergie dans l'angle solide correspondant qui se traduit par un gain de transmission.

On définit le gain d'une antenne par le rapport entre l'énergie émise par cette antenne dans une direction donnée, et celle qui serait émise dans cette direction par une antenne omnidirectionnelle ou isotrope.

L'antenne omnidirectionnelle, qui est utilisée comme référence est certainement la plus difficile à réaliser. Dans son principe, une antenne de ce type doit, si elle est soumise à une excitation, rayonner des ondes identiques dans toutes les directions. Cela revient à dire que cette antenne recevant une énergie « E » la répartira uniformément dans toutes les directions. On ne parlera plus en un point déterminé de l'espace d'énergie (ou de puissance) émise mais de densité d'énergie par unité d'angle solide.

L'angle solide correspondant à l'espace complet est 4π , **la densité d'énergie rayonnée par une antenne omnidirectionnelle** reliée à une source d'énergie « E_e » sera dans toutes les directions :

$$\frac{dE}{d\Omega} = \frac{E_e}{4\pi}$$

Par définition, **la densité d'énergie rayonnée dans la direction (θ, Φ) par une antenne de gain $G(\theta, \Phi)$** sera donc par unité d'angle solide :

$$\frac{dE}{d\Omega} = \frac{E_e}{4\pi} \cdot G(\theta, \Phi)$$

La densité d'énergie émise par un radar dépend donc du gain de son aérien. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons particulièrement à ce qui se passe dans la direction du gain maximum de l'aérien.

2.2 ROLE DE L'ANTENNE A LA RECEPTION, NOTION DE SURFACE EFFECTIVE

Tout signal radioélectrique émis par une source, se propage à la même vitesse dans toutes les directions et donne naissance à une onde sphérique.

L'énergie émise par la source à l'instant zéro se trouve donc répartie à l'instant t sur une sphère de rayon : $C.t$ (C vitesse de propagation de l'onde dans le vide ou l'air, 3.10^8 m/s).

La densité d'énergie à une distance « D » de la source est alors par unité de surface :

$$\frac{dE}{dS} = \frac{1}{D^2} \frac{dE}{d\Omega}$$

L'antenne du radar est mise en présence de cette densité d'énergie, elle en capte une partie et l'aiguille vers le récepteur. La quantité d'énergie recueillie par l'aérien dépend de ses caractéristiques. Nous allons établir la relation liant l'énergie reçue à la densité d'énergie en présence et aux caractéristiques de l'aérien, à l'aide de l'exemple suivant.

Soit un aérien du type **ouverture plane à loi d'éclairement uniforme**. Son gain maximum est (cf. chapitre 5).

$$G = \frac{4 \pi S}{\lambda^2}$$

expression où :

- S est la surface de l'ouverture,
- λ est la longueur d'onde utilisée.

De par son principe, un tel aérien répartit sur toute sa surface les signaux qui lui sont délivrés pour former une infinité de signaux élémentaires d'amplitudes et de phases égales.

Si une puissance P lui est délivrée, cette puissance sera uniformément répartie sur toute la surface de l'ouverture sous la forme d'une densité de puissance :

$$\frac{dP}{dS} = \frac{P}{S} = ct^{\circ}$$

Réciproquement, si une ouverture plane à loi d'éclairement uniforme est excitée par des signaux de même amplitude et de phases égales tels que la densité de puissance sur l'ouverture soit :

$$\frac{dP}{dS} = ct^{\circ}$$

elle recueillera une puissance :

$$P_r = S \frac{dP}{dS}$$

Les dimensions de l'antenne sont généralement faibles devant la distance D qui la sépare de la source. Lorsque l'aérien est orienté vers la source, il est donc soumis à des signaux égaux en amplitude et en phase. Il recueille donc une énergie :

$$E_r = S \cdot \frac{dE}{dS} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dS}$$

Les aériens réels se différencient de l'ouverture plane à éclairement uniforme par la manière dont ils émettent et captent l'énergie des ondes. Mais on peut toujours écrire qu'une antenne de gain « G » est équivalente à un aérien à loi d'éclairement uniforme de même gain et dont la surface serait :

$$A = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

« A » est appelée **surface effective** ou surface radioélectrique de l'antenne.

D'où l'énergie captée par un aérien réel :

$$E_R = A \cdot \frac{dE}{dS} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dS}$$

Cette relation est généralisable quelle que soit la direction de l'aérien, G étant le gain de l'aérien dans la direction de propagation de l'onde recueillie.

On notera en outre que, lorsque la surface géométrique d'une antenne est bien définie, ce qui est en général le cas des aériens radar, son gain maximum est donné par la relation :

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \cdot f$$

relation où :

- S est la surface géométrique de l'aérien,
- f est le facteur de gain de l'aérien.

Une antenne radar est donc équivalente à une ouverture à éclairage uniforme de surface :

$$A = f \cdot S$$

Le facteur de gain « f » dépend de la loi d'éclairage choisie, de la forme de l'aérien, et des pertes dans la répartition de l'énergie. Dans les cas courants, f est compris entre 0,4 et 0,8.

On constate, par ailleurs, que le gain d'une antenne est proportionnel à sa surface et inversement proportionnel au carré de sa longueur d'onde.

Cette remarque explique que, dès qu'il y a peu de place disponible pour loger un aérien, il devient indispensable d'utiliser des fréquences très élevées. C'est en particulier le cas des radars embarqués.

3 REFLEXION DES ONDES PAR UNE CIBLE NOTION DE SURFACE EQUIVALENTE

Une cible se comporte comme une antenne de forme complexe, elle intercepte une part de l'énergie dans laquelle elle est baignée, en absorbe une certaine quantité et réémet le reste dans toutes les directions.

L'énergie réémise par une cible dans la direction du radar est extrêmement variable, elle dépend énormément de l'orientation de la cible par rapport au radar. Des rapports de 1 à 100 sont couramment observés.

La fréquence de l'onde a également son importance, certaines réflexions pouvant être sélectives. En outre, la forme de l'objet influe sur l'énergie réémise, les points « anguleux », hélices, réacteurs, antennes, etc... favorisent la réflexion.

Nous retiendrons que l'énergie réémise par une cible présente un caractère essentiellement fluctuant et qu'elle n'est caractérisable qu'en moyenne.

En pratique, on a défini la faculté de rerayonnement d'une cible par sa **surface équivalente** « σ » qui représente le rapport moyen entre l'énergie réémise par la cible dans la direction du radar, et la densité d'énergie qu'elle perçoit.

Plus précisément, nous dirons qu'une cible de surface équivalente σ se comporte comme si elle captait σ fois la densité d'énergie dans laquelle elle est baignée et la réémettait de manière omnidirectionnelle.

Ce paramètre, choisi pour des raisons pratiques, n'a aucun rapport avec la surface effective d'une antenne. Les valeurs de surfaces équivalentes couramment admises sont :

Long courrier	=> 100 m ²
Moyen courrier	=> 50 m ²
Transport léger	=> 20 m ²
Avion « armé »	=> 10 m ²
Avion « léger »	=> 1 m ²
Avion « discret »	=> 0,1 m ²
Avion « furtif »	=> 0,01 m ²
Missile « furtif »	=> 0,001 m ²

Les avions aérodynamiquement fins ont généralement des surfaces équivalentes relativement faibles, les avions à hélice des surfaces équivalentes relativement élevées.

4 EQUATION DE PROPAGATION

Les relations précédentes étant établies, nous pouvons maintenant établir l'équation de propagation du radar qui reliera l'énergie perçue par le radar : « E_r », à l'énergie émise par celui-ci.

Considérons un radar dont les caractéristiques sont les suivantes :

- gain d'antenne G ,
- surface effective de l'antenne : $A = G \cdot \lambda^2 / 4\pi$,
- puissance crête émise P_c ,
- durée de l'impulsion émise τ .

et une cible de surface équivalente σ placée à une distance D du radar.

L'énergie émise à chaque impulsion par le radar est : $P_c \cdot \tau$

Si l'antenne émettrice était omnidirectionnelle, cette énergie serait répartie uniformément dans toutes les directions. A une distance D du radar, la densité d'énergie traversant une surface unitaire serait alors :

$$\left(\frac{dE}{dS} \right)_0 = \frac{P_c \tau}{4\pi \cdot D^2}$$

L'aérien étant de gain G , et par définition même du gain, la densité d'énergie émise dans la direction du gain maximum est :

$$\left(\frac{dE}{dS} \right)_1 = \frac{P_c \tau}{4\pi \cdot D^2} \cdot G$$

La cible est de surface équivalente σ , par hypothèse, elle capte σ fois la densité d'énergie :

$$\left(\frac{dE}{ds} \right)_1$$

et la réémet de manière omnidirectionnelle.

L'énergie captée par la cible s'écrit donc :

$$E_c = \sigma \left(\frac{dE}{dS} \right)_1 = \frac{P_c \tau}{4\pi \cdot D^2} \cdot G\sigma$$

et la densité d'énergie réémise par la cible est au niveau du radar donc à la distance D de la cible :

$$\left(\frac{dE}{dS} \right)_2 = \frac{E_c}{4\pi \cdot D^2} = \frac{P_c \tau}{4\pi \cdot D^2} \cdot G\sigma \cdot \frac{1}{4\pi \cdot D^2}$$

L'antenne du radar (cf. paragraphe 2) capte une énergie :

$$E_r = A \left(\frac{dE}{dS} \right)_2 = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \cdot \left(\frac{dE}{dS} \right)_2$$

soit :

$$E_r = \frac{P_c \tau}{4\pi \cdot D^2} \cdot G\sigma \cdot \frac{1}{4\pi \cdot D^2} \cdot \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

ou :

$$E_r = \frac{P_c \tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4}$$

Ce qui précède ne présume pas des atténuations ou détériorations diverses subies par le signal au cours de son cheminement.

En pratique, il faut tenir compte :

- des pertes dans la propagation du signal,
- des pertes dans les circuits hyperfréquence du radar,
- des pertes dues au traitement du signal dans le récepteur,
- des pertes dans l'extraction du signal et l'exploitation de l'information,
- des pertes dues au mouvement de l'aérien.

Il faudra donc pondérer le résultat précédent par un coefficient de pertes L et on écrira :

$$E_r = \frac{P_c \tau \cdot G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L}$$

ÉQUATION DE PROPAGATION DU RADAR

L'analyse détaillée des diverses causes de pertes, et leur estimation, font l'objet du chapitre 11. Les valeurs usuelles du coefficient L sont comprises entre 3 et 20, son influence est donc considérable.

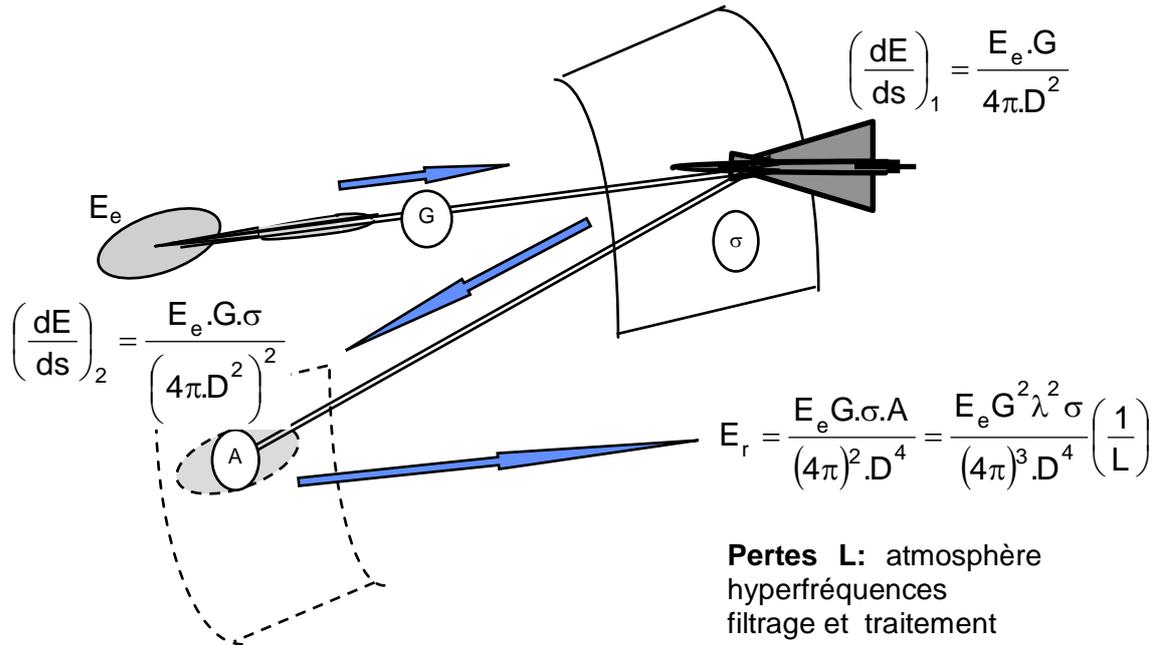
5 APPLICATION PRATIQUE DE L'EQUATION DE PROPAGATION

Le calcul de l'énergie reçue, E_r se ramène, une fois fixés les différents paramètres, à la résolution numérique de l'équation précédente.

Néanmoins, suivant les conditions d'utilisation du radar et la géométrie de la propagation, tout ou partie des paramètres utilisés peuvent varier.

Il convenait donc d'adopter une méthode de calcul simple, ce que les radaristes ont fait en utilisant une « notion élargie », et assez peu rigoureuse d'ailleurs, du décibel.

EQUATION DE PROPAGATION DU RADAR



EQUATION DE PROPAGATION SYNTHESE

Le décibel, qui est utilisé pour exprimer un rapport de puissance ou d'énergie, est déterminé par la relation :

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

ou :

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

Nous adopterons les unités du système MKSA et pourrons exprimer le rapport :

$$\left(\frac{E_r \text{ (joules)}}{1 \text{ (joule)}}\right)_{dB} = 10 \log (E_r)$$

qui est l'expression de « E_r » en décibels par rapport au joule, notée : $(E_r)_{dB/Joule}$.

Soit, en utilisant l'équation du radar :

$$(E_r)_{dB/Joule} = 10 \log \left(\frac{P_c \cdot \tau \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot D^4 \cdot L} \right)$$

ou :

$$(E_r)_{dB/Joule} = 10 \log (P_c \cdot \tau) + 2 \cdot 10 \log (G) + 2 \cdot 10 \log (\lambda) + 10 \log (\sigma) - (3 \cdot 10 \log (4\pi) + 4 \cdot 10 \log (D) + 10 \log L)$$

doit :

$$(E_r)_{dB/Joule} = 10 \log (P_c \cdot \tau) + 20 \log (G) + 20 \log (\lambda) + 10 \log (\sigma) - (30 \log (4\pi) + 40 \log (D) + 10 \log L)$$

Dans cette expression :

$$10 \log (G) = (G)_{dB} \text{ ou } G_{dB}$$

et : $10 \log(L) = (L)_{dB}$ ou L_{dB}

car L et G sont des rapports d'énergie (ou de puissance).

La tentation était forte de généraliser, ce que les radaristes ont fait en écrivant que :

$$10 \log(P_c \tau) = (P_c \tau)_{dB/Joule}$$

ce qui reste conforme à la définition, et :

$$10 \log(\lambda) = (\lambda)_{dB/m}$$

$$10 \log(\sigma) = (\sigma)_{dB/m^2}$$

$$30 \log(4\pi) = 33_{dB}$$

$$10 \log(D) = (D)_{dB/m}$$

ce qui l'est beaucoup moins.

Ce mode de calcul en « décibels » est une habitude chère aux radaristes qui manient avec une rare dextérité les décibels justifiés et les autres.

La méthode est probablement critiquable par les puristes, mais elle permet une application aisée des calculs logarithmiques grâce à l'utilisation de nombres faciles à retenir... une fois l'habitude prise !...

Un tableau de correspondance dB ↔ nombre résumant les cas les plus caractéristiques, est donné ci-après :

nombre	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	7	8	9	10	100	1000
décibel : dB	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,5	9	9,5	10	20	30

En pratique, pour éviter les erreurs de calcul, on traduira les valeurs numériques utilisées dans les unités du système MKSA. On pourra ensuite les traduire en dB et les porter dans le calcul. Le signe attribué à chacun des termes dépendra ensuite de sa position dans l'équation utilisée.

Pour faciliter les calculs, il est recommandé de les présenter sous forme de tableau comme dans les exemples suivants :

Exemple 1 : $P_c = 10 \text{ MW}$, $\tau = 2 \mu\text{s}$, $G = 45 \text{ dB}$, $\sigma = 1 \text{ m}^2$
 $L = 8 \text{ dB}$, $D = 500 \text{ km}$, $\lambda = 10 \text{ cm}$.

	+	-
$P_c \tau = 20 \text{ Joules} = 13 \text{ dB}$	13	
$G = 45 \text{ dB}, G^2 = 90 \text{ dB}$	90	
$\lambda = 0,1 \text{ m} = -10 \text{ dB}, \lambda^2 = -20 \text{ dB}$		20
$\sigma = 1 \text{ m}^2 = 0 \text{ dB}$	0	
$D = 5 \cdot 10^5 = 57 \text{ dB}, D^4 = 228 \text{ dB}$		228
$L = 8 \text{ dB}$		8
$(4\pi)^3 = 33 \text{ dB}$		33
$E_r = -186 \text{ dB/Joule}$	103	-289
$E_r = 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ joules}$	⏟	

Exemple 2 : $P_c = 1\text{MW}$, $\tau = 4 \mu\text{s}$, $G = 40 \text{ dB}$, $\sigma = 3 \text{ m}^2$
 $L = 8 \text{ dB}$, $D = 300 \text{ km}$, $\lambda = 10 \text{ cm}$.

$P_c \tau = 4 \text{ Joules} = 6 \text{ dB}$	+	6	-	
$G = 40 \text{ dB}$, $G^2 = 80 \text{ dB}$		80		
$\lambda = 0,1 \text{ m} = -10 \text{ dB}$, $\lambda^2 = -20 \text{ dB}$				20
$\sigma = 3 \text{ m}^2 = 5 \text{ dB}$		5		
$D = 3 \cdot 10^5 = 55 \text{ dB}$; $D^4 = 220 \text{ dB}$				220
$L = 8 \text{ dB}$				8
$(4\pi)^3 = 33 \text{ dB}$				33
$E_r = -190 \text{ dB/Joule}$		91		-281
$E_r = 10^{-19} \text{ joules}$.		⏟		

6 ORDRE DE GRANDEUR DES SIGNAUX PERÇUS PAR LES RADARS

Nous venons sur deux exemples de voir que les signaux perçus par le radar étaient extrêmement faibles. En effet, la puissance crête des signaux reçus est :

$$\frac{2,5 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 10^{-6}} = 1,25 \cdot 10^{-13} \text{ W dans le premier cas, et de}$$

$$\frac{10^{-19}}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,25 \cdot 10^{-13} \text{ W dans le second.}$$

Le récepteur radar doit donc être très sensible. On arrive à utiliser des sensibilités de l'ordre du milli pico watt, soit :

$$10^{-15} \text{ W.}$$

Mais ici, la sensibilité du récepteur n'est pas un seuil de perception du signal, c'est le bruit du radar qui vient la limiter, en effet :

La puissance de bruit d'un récepteur de facteur de bruit 4 dB et de bande 1 MHz est :

$$B = F \cdot K T_0 \Delta F \quad \left\{ \begin{array}{l} K T_0 \cong -204 \text{ dB} \\ \Delta F = 60 \text{ dB} \\ F = 4 \text{ dB} \end{array} \right.$$

$$B = -140 \text{ dB/W}$$

$$B = 10^{-14} \text{ W}$$

On voit donc que les niveaux du signal utile et du bruit du récepteur sont comparables. Le signal ne parvient pas seul au radar, il est accompagné d'un bruit non négligeable, dont la structure varie dans le temps, et qui est amplifié avec lui.

Il est important de remarquer ici que la méthode de calcul employée précédemment pour comparer la puissance du bruit et du signal utile n'est à considérer qu'à titre d'exemple.

En effet, elle ne tient pas compte du filtrage du bruit et du signal par le récepteur radar (cf. chapitre 9). Nous verrons plus loin comment faire intervenir cette action.

7 EXPOSE DU PROBLEME RADAR – CONCLUSIONS

Le problème radar est celui de la reconnaissance d'un signal en provenance d'une cible lorsqu'il est mélangé avec du bruit.

Le bruit vient perturber la détection du signal utile et ceci de plusieurs manières :

- en venant se superposer au signal utile et le masquer ;
- en créant des signaux qui peuvent être pris pour des signaux utiles ;
- en déformant le signal utile.

Le premier effet vient limiter la sensibilité du récepteur radar, les signaux trop faibles venant se noyer dans le bruit du radar et par le fait ne pouvant être perçus.

Le second effet vient créer de fausses indications ou « fausses alarmes ».

Le troisième effet vient rendre plus aléatoire l'identification d'un signal utile et donc diminuer les chances de découvrir les cibles observées par le radar.

On ne pourra donc parler pour un radar de vision absolue d'une cible et l'on sera amené à définir :

Une probabilité de détection qui est la probabilité de voir une cible où elle existe réellement.

Une probabilité de fausse alarme qui est la probabilité de voir une cible là où il n'y a rien.

La définition précise de ces deux facteurs, qui caractérise la qualité de la réception d'un radar, exige d'approfondir l'action du récepteur radar sur le signal et sur le bruit qui l'accompagne, et d'étudier les propriétés statistiques du bruit et du mélange signal bruit.

Les chapitres suivants traiteront de ces différentes questions.
