

INSTITUT D'ÉLECTRONIQUE ET
DE TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE RENNES

INTRODUCTION AU RADAR

Réseau des Electroniciens

C. BROUSSEAU

Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes
UMR CNRS N° 6164 - UNIVERSITE DE RENNES 1
Bât. 11D - Campus de Beaulieu - 35042 - RENNES Cedex - FRANCE
Tél : (33) 2 23 23 62 31 - Fax : (33) 2 23 23 56 16
Mél : christian.brousseau@univ-rennes1.fr




Plan

- Introduction
- Un peu d'histoire
- Principaux types de radar
- Equation du radar
- Principaux types de radar
 - Radar à ondes continues
 - Radar à impulsions
- Conclusions & Perspectives
- Références bibliographiques

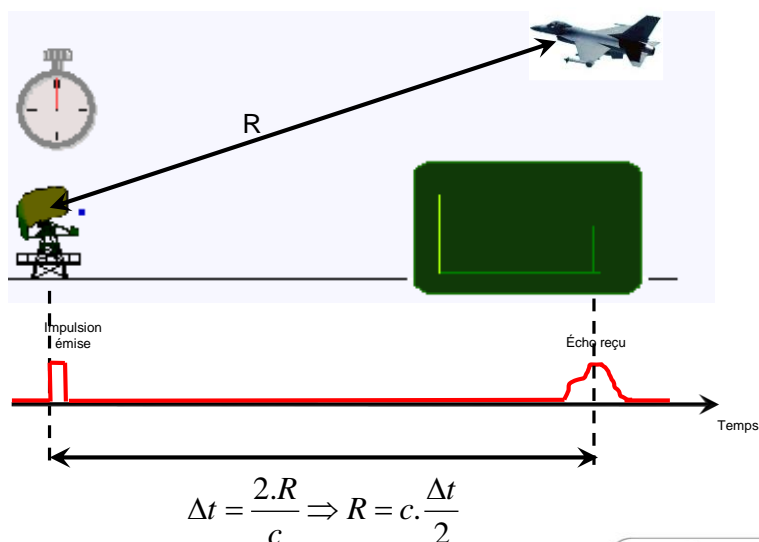
I. Introduction

Définition du radar

- **RADAR** : **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging
 - Détection et télémétrie radio :
 - Utilisation des ondes radio pour la détection et la localisation de cibles.
 - Principe :
 - Utilisation de la propriété de **réflexion** (totale ou partielle) des ondes radioélectriques sur tout obstacle (**cible**) rencontré.
- 
- The diagram shows a parabolic radar antenna on the left, emitting a green wavy signal towards a small blue dot representing a target on the right.
- Intérêts des ondes électromagnétiques : **Pénétration**
 - Objectifs souhaités :
 - Détermination de la **position**, de la **vitesse** et de la **type** de cible mesurée.
 - رادار (râdhar) : Guetteur de la route (Perse).

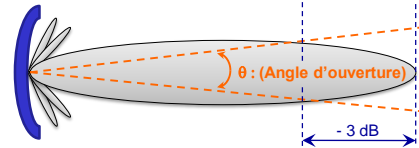
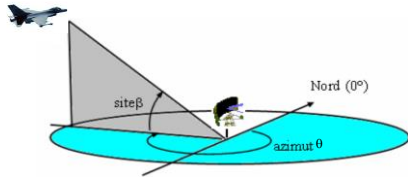
- **Cible :**
 - Tout objet qui interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de l'énergie vers le radar.
- **Fouillis (clutter) :**
 - Réflexions liées aux objets non désirés :
 - Mer, sol, pluie, oiseaux, insectes, météorites, ...
- **Brouilleurs :**
 - Emetteurs non-coopératifs perturbant volontairement ou non, la réception radar.
- **Bruits :**
 - Rayonnements électromagnétiques liés aux activités humaines, aux variations météorologiques, au soleil, aux galaxies.

- Mesure de la distance :



- Principe :

- Utilisation d'une **antenne** tournante ayant une **directivité élevée**.



- Antenne usuelle : **Parabole**

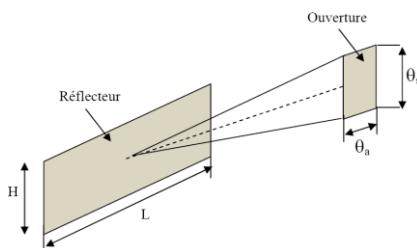
- Ouverture à -3 dB [1] : $\theta \approx 70 \cdot \frac{\lambda}{l}$ (deg.)

- λ : longueur d'onde émise,
- l : diamètre de l'antenne.

- A.N. : $f = 1,5 \text{ GHz}$ et $\theta = 1^\circ \rightarrow l = ?$



- Utilisation d'antennes directrices à **ouverture rectangulaire**.



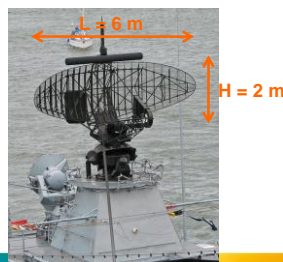
$$\theta_a \approx 70 \cdot \frac{\lambda}{L} \text{ (deg.)}$$

$$\theta_s \approx 70 \cdot \frac{\lambda}{H} \text{ (deg.)}$$

(Pour une antenne directive:)

$$G \approx 10 \cdot \log \left(\frac{26000}{\theta_a \cdot \theta_s} \right)$$

- Exemple : Radar 2D EADS - JUPITER/LW 08 (Bande L – 1,5 GHz)



$$\theta_a =$$

$$\theta_s =$$

- Définition :

- Décalage entre la fréquence de l'onde émise et de l'onde reçue lorsque l'émetteur et/ou le récepteur sont en mouvement.

- Il apparaît aussi lorsque l'onde se réfléchit sur un objet en mouvement par rapport à l'émetteur ou au récepteur.

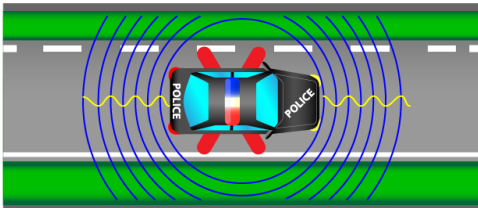


[4] : Christian Doppler, Mathématicien et physicien autrichien (1803 – 1863).

- Effet de « compression » du front d'onde lié au déplacement [5] :

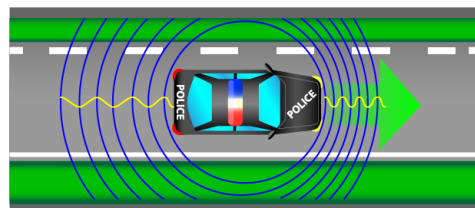
Objet stationnaire

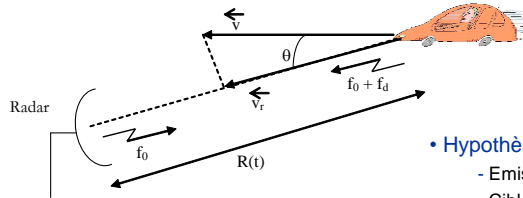
Les ondes sonores sont les mêmes dans toutes les directions
La hauteur du son est la même dans toutes les directions



Objet en mouvement

Des ondes plus longues derrière, des ondes plus courtes devant
Un son plus grave à l'arrière, un son plus aigu devant





• Hypothèses :

- Emission/réception fixes
- Cible mobile.

• Expression des signaux :

- Emission : $v_e(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \phi_0)$

- Réception : $v_r(t) = A' \cdot \sin\left[2\pi \cdot f_0 \cdot \left(t - \frac{2 \cdot R(t)}{c}\right) + \phi_0\right] = A' \cdot \sin[\Phi(t)]$

• Expression de la fréquence instantanée en réception :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} = f_0 - \frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

$$f_r = f_0 - \frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot v_r$$



$$f_d = f_r - f_e = \pm \frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot |v_r|$$

$$(v_r = v \cdot \cos(\theta))$$

- (+) : rapprochement ; (-) : éloignement.

• Exercice 1 : Radar fixe MESTA 208

- Le MESTA 208 est un radar à poste fixe d'une grande fiabilité, notamment grâce à la précision de ses mesures. Il peut être jumelé à un système photographique. D'un point de vue opérationnel, ce radar doit présenter un écart angulaire de 25° entre l'axe de visée du radar et l'axe de déplacement des véhicules mesurés.
- Ses caractéristiques sont les suivantes :
 - Portée : 40/50 m maximum mais plus souvent utilisé à 10/20m,
 - Nombre en service : 750,
 - Etendue de mesure : 30 à 250 km/h,
 - Fréquence : 24,125 GHz,
 - Prix : 9900 €.
- Ce système évalue la vitesse d'un véhicule par la mesure du décalage Doppler.
- Calculer la fréquence Doppler pour un véhicule roulant à 130 km/h ainsi que la plage de variation de de la fréquence Doppler.
- Si l'opérateur dépointe l'axe de visée du radar de 10°, quelle est l'erreur sur l'estimation de la vitesse pour la même fréquence Doppler que précédemment.



Exercice 4 : Radar MESCA 208

$$v = 130 \text{ km/h} = 36,11 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow f_d = \frac{2 f_0}{c} \cdot v_r = \frac{2 f_0}{c} \cdot v \cdot \cos(\alpha)$$

* pour $v = 30 \text{ km/h} = 8,33 \text{ m/s}$
 $\Rightarrow f_d = 1,214 \text{ kHz}$

- pour $v = 250 \text{ km/h} = 69,44 \text{ m/s}$
 $\Rightarrow f_d = 10,121 \text{ kHz}$

- pour $v = 130 \text{ km/h} = 36,11 \text{ m/s}$
 $\Rightarrow f_d = 5,263 \text{ kHz}$

13

* si $\alpha = 35^\circ$ et $f_d = 5,263 \text{ kHz}$

$$\Rightarrow v = \frac{c \cdot f_d}{2 f_0 \cos(\alpha)} = 39,95 \text{ m/s} = 143,8 \text{ km/h}$$

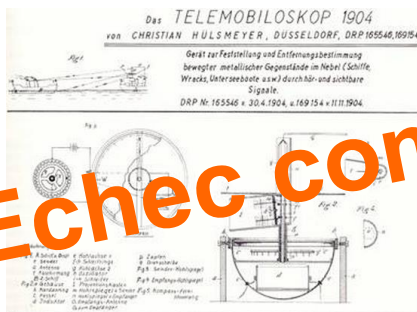
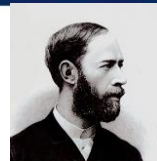
* si $\alpha = 15^\circ$ et $f_d = 5,263 \text{ kHz}$

$$\Rightarrow v = 33,88 \text{ m/s} = 121,95 \text{ km/h}$$

14

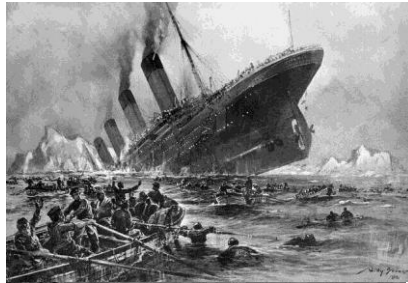
II. Un peu d'histoire ...

- 1886 : **H. Hertz** découvre la réflexion des ondes radio sur des objets solides
- 1904 : **C. Hülsmeier** invente le « **Telemobiloskop** »
 - Démonstration de la possibilité de détecter la présence de bateaux dans un brouillard très dense (essais sur le Rhin),
 - Présentation officielle lors du congrès nautique de Rotterdam en juin 1904,
 - Démonstration peu convaincante : Pas de détermination de la distance,
 - Peu d'intérêts des autorités.



Echec commercial

- 1912 : Lancement du **Titanic**.
- 14 avril 1912 (voyage inaugural) : naufrage du Titanic (**1500 morts**).



➔ **Nécessité absolue d'un moyen de détection « tout temps »**

- Difficulté : Concevoir une source d'émission de forte puissance et fonctionnant à des fréquences élevées

17

- 1934 : Invention du magnétron par **Maurice Ponte** (France)
 - Emission de forte puissance à des fréquences élevées (jusque 500 W à la fréquence de plusieurs Gigahertz).



- 20 juillet 1934 : 1^{er} brevet pour un « **appareil de détection** » à ondes centimétriques
 - Installation expérimentale sur le cargo « Orégon » (Compagnie Générale Transatlantique).

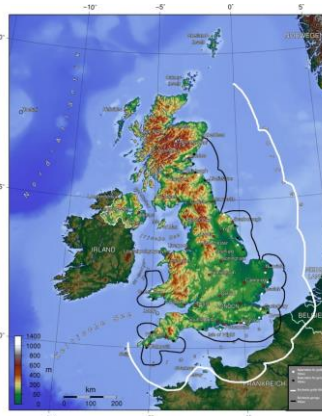


18

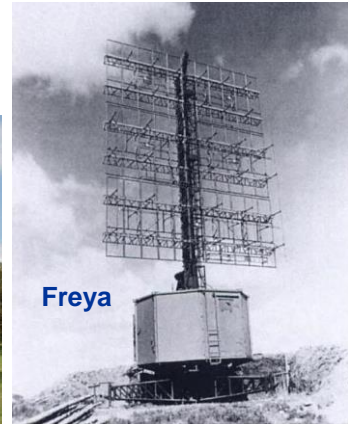
- 1935 : Production en série par la Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil (CSF) :
 - Installation opérationnelle sur le paquebot « Normandie ».



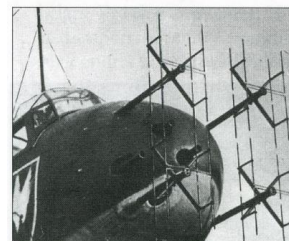
- 26 février 1935 : Démonstration par **Robert Watson-Watt** de la détection d'avions en utilisant un émetteur de la BBC.
- 1937 : Mise en place du 1^{er} réseau de stations radar opérationnel :
 - La « **Chain Home** » constituée d'une vingtaine de stations radar :
 - Barrières électromagnétiques.
 - Application :
 - Détection des tempêtes en approche.



- 1937 : *Freya* - 1^{er} radar sol pour la veille aérienne (Allemagne) :
 - Utilisation d'une **antenne orientable**.



- 1941 : 1^{er} radar aéroporté (Allemagne) :
 - Bombardement et chasse de nuit.



Messerschmitt Bf 110

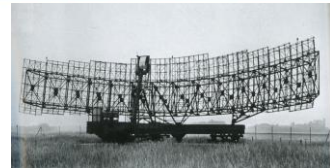
- 1954 : Invention du radar à synthèse d'ouverture :
 - SAR : Synthetic Aperture Radar
 - Utilisation de l'effet du déplacement du radar sur la mesure.

Imagerie radar



23

- 1963 : 1^{er} radar français à compression d'impulsion (CONRAD).
- 1965 : Apparition du **traitement numérique du signal** :
 - « Découverte » de l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT) par James Cooley et John Tukey (USA).
 - 1805 : Carl Friedrich Gauss



- 1975 : *Louxor* - Radar à balayage électronique (France).
- Années 1980 : 22XX - Apparition de l'antenne-dalle pour le radar (France).



UMR 6164



24

- **Militaire :**
 - Radars de détection et de surveillance aérienne au sol ou embarqués (sur chasseurs pour le combat aérien et sur AWACS), radars de veille de surface sur les navires de guerre, radars d'atterrissage ou d'appontage, identification ami-ennemi, autoguidés de missiles, radars de détection terrestre, radars d'artillerie, brouilleurs radar, satellites radar d'observation de la terre.
- **Aéronautique :**
 - Contrôle du trafic aérien, guidage d'approche d'aéroport, radars d'altimétrie, radars de navigation.
- **Météorologie :**
 - Détection de précipitations (pluie, neige, ...) et de formations nuageuses, évaluation de la vitesse des particules, indication du type de précipitation.
- **Circulation et sécurité routière :**
 - Contrôle de la vitesse des automobiles, radar de régulation de distance (ACC Adaptive Cruise Control).
- **Industriel :**
 - Radar de sondage de sol (GPR Ground Penetrating Radar) en génie civil, comptage de pièces en environnement perturbé, surveillance de zone, ouverture automatique de portes, ...
- **Scientifique :**
 - Radars embarqués sur avions ou satellites pour l'observation de la Terre (végétation, couvert neigeux, du niveau des océans, ...), étude de l'atmosphère (ionosphère, ...).



- **MASTER – Radar de défense aérienne longue portée (Thalès - France).**



- **PAVE PAWS - Radar d'alerte précoce pour les missiles balistiques (USA).**



- **AMSAR – Radar multifonction aéroporté - Euro-Fighter Typhoon (BAE Systems).**



- **Nostradamus – Radar HF transhorizon (ONERA - France).**

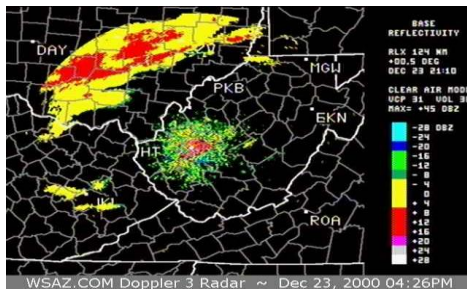
Radars météorologiques du réseau ARAMIS (Météo France) [8]



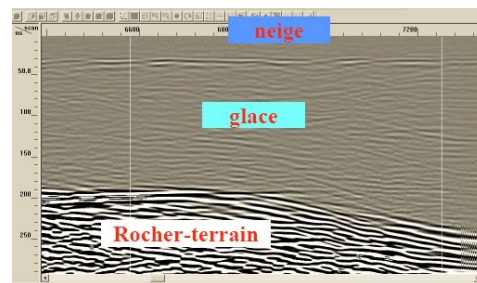
Bollène (Vaucluse)



Collobrières (Var)



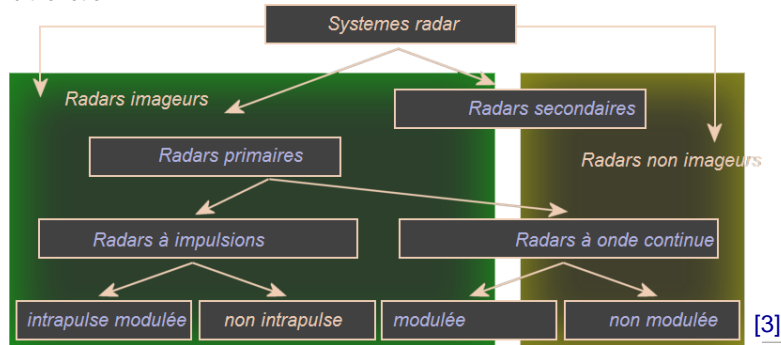
Radars de sondage de sol (GPR : Ground Penetrating Radar) [9]



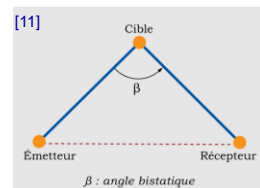
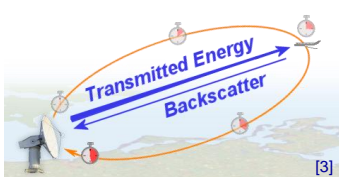
INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET
 DE TELECOMMUNICATIONS
 DE RENNES

III. Principaux types de radar

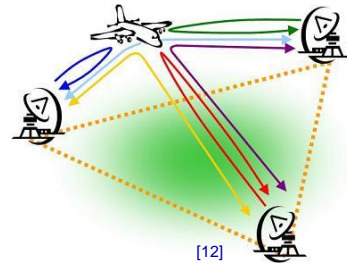
- Selon le type :
 - Primaires.
 - Secondaires.
- Selon l'objectif :
 - De veille ou de surveillance (à balayage),
 - De poursuite,
 - Multifonction.
- Selon la résolution :
 - Conventionnels,
 - Haute résolution.
- Selon le type de signal :
 - A onde continue (CW),
 - A impulsions.



- Selon la position relative de l'émetteur et du récepteur :
 - **Monostatique (quasi-monostatique)** : Emission et réception sur une antenne unique (émission et réception sur des antennes très proches).
 - Avantages :
 - Simplicité de mise en œuvre.
 - Inconvénients :
 - La réception ne peut avoir lieu pendant l'émission (zone aveugle),
 - L'émission ne peut-être continue.
 - **Bistatique** : Un émetteur et un récepteur séparés par une certaine distance.
 - Avantages :
 - Emission CW possible,
 - Lutte contre la furtivité.
 - Inconvénients :
 - Communication nécessaire entre l'émetteur et le récepteur pour la synchronisation.

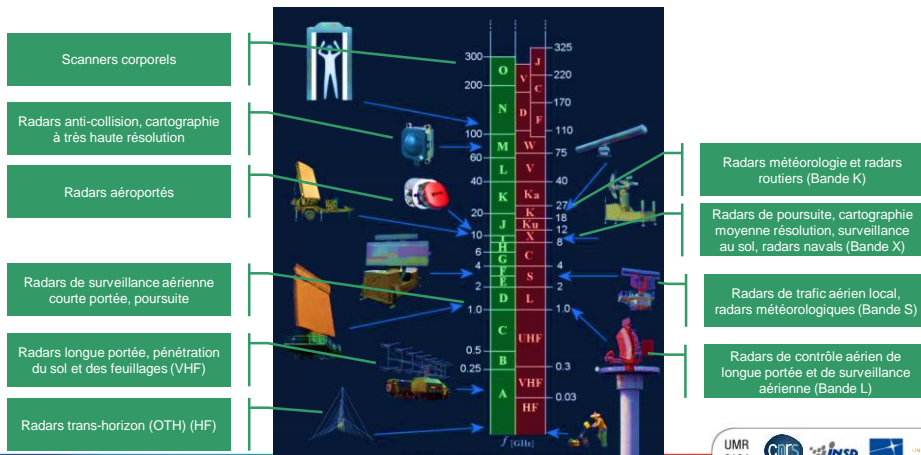


- **Multistatique (MIMO)** : Utilisation de plusieurs émetteurs et de plusieurs récepteurs, séparés d'une certaine distance.
 - Avantages :
 - Possibilité de positionner l'émetteur loin du champ de bataille et avoir des récepteurs (passifs) disséminés sur le champ de bataille,
 - Reconnaissance de cibles.
 - Inconvénient :
 - Difficile à mettre en œuvre.



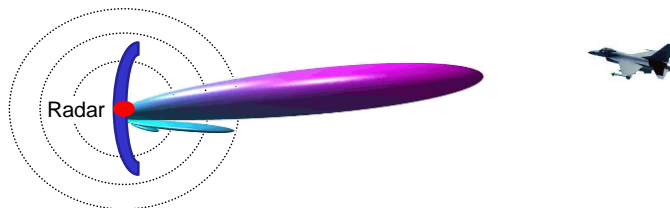
- Selon l'architecture :

- **Actifs** : Emission générée par le radar.
- **Passifs** : Utilisation d'émetteurs non-coopératifs (TV, FM, GSM, ...).
 - Avantages :
 - Indétectable,
 - Grand nombre d'émetteurs disponibles.
 - Inconvénient :
 - Nécessité d'un système de réception de l'émetteur non-coopératif.



IV. Equation du radar

Equation du radar sans bruit ni pertes

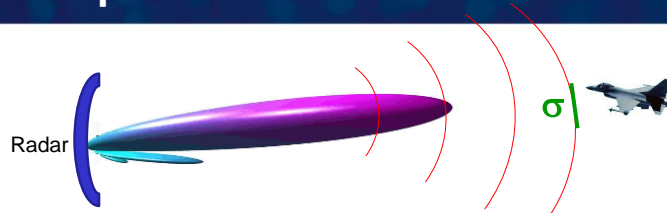


- Antenne de référence : **Antenne isotrope**
 - Antenne qui rayonne de la même façon dans toutes les directions.
 - Densité de puissance surfacique (à une distance R) :

$$p(d) = \frac{P_e}{4\pi \cdot R^2} \quad \text{en } W / m^2$$

- Antenne d'émission : **Gain**
 - Concentration de la puissance rayonnée dans certaines directions de l'espace (θ, φ).
 - Introduction du gain de l'antenne d'émission $G_e(\theta, \varphi)$ tel que :

$$P'_e = G_e(\theta, \varphi) \cdot P_e$$



- Puissance surfacique à une distance R (trajet aller) : $P_{s_R} = \frac{P_e \cdot G_e}{4\pi \cdot R^2}$
 - Avec :
 - G_e : Gain de l'antenne d'émission,
 - P_e : Puissance émise,
 - $P_e \cdot G_e$: **PIRE** (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente).
- Cible assimilée à une antenne de réception :
 - σ : **SER** (Section Efficace Radar) de la cible en m^2 .
 - Aire équivalente ou aire de captation de la cible.

- Puissance renvoyée par la cible dans la direction du radar : $P_r = \left(\frac{P_e}{4\pi \cdot R^2} \cdot G_e \right) \cdot \sigma$

- Puissance surfacique à la réception (trajet retour) :

$$P_{s_R} = \left(\frac{P_e}{4\pi \cdot R^2} \cdot G_e \cdot \sigma \right) \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R^2}$$

- Puissance reçue captée par l'antenne de réception :

- **Aire équivalente** A_r (m^2) ou **aire de captation**

$$P_r = \left[\left(\frac{P_e}{4\pi \cdot R^2} \cdot G_e \cdot \sigma \right) \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R^2} \right] \cdot A_r$$

- Relation entre l'aire équivalente et le gain : $\frac{G_r}{A_r} = \frac{4\pi}{\lambda^2}$

- Puissance reçue par l'antenne de gain G_r :

$$P_r = \left(\frac{P_e}{(4\pi)^2 \cdot R^4} \cdot G_e \cdot \sigma \right) \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_r$$

- Equation du radar sans bruit, ni pertes :

$$P_r = \frac{P_e \cdot G_e \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \cdot \sigma$$

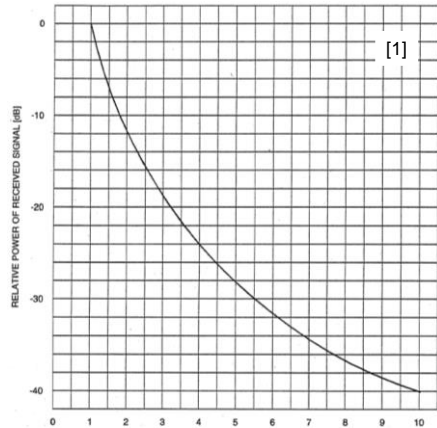
- Avec σ , la SER de la cible dépendant de :

- La longueur d'onde λ ,
- La polarisation à l'émission,
- La polarisation à la réception,
- La forme de la cible,
- Les caractéristiques électriques de la cible (ϵ, μ, σ),
- L'orientation de la cible vis-à-vis du radar.

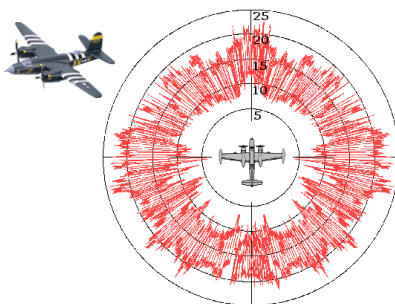
- Condition de validité :

- Distance de Fraunhofer : $R > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$

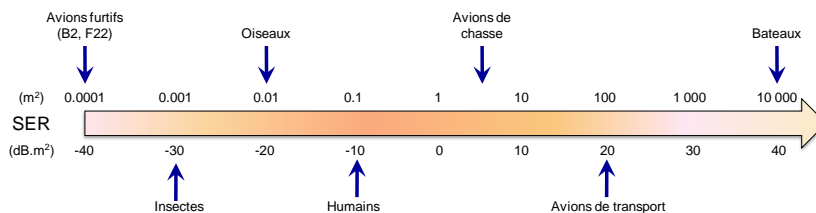
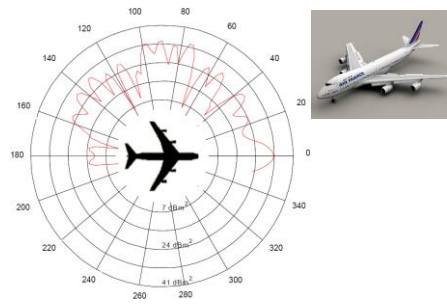
- Avec D , la plus grande dimension de l'antenne.



- SER d'un Bombardier B-26 à la fréquence de 3 GHz ($\lambda = 10$ cm) en fonction de l'azimut [1] :



- SER d'un Boeing 747-200 à la fréquence de 20 MHz ($\lambda = 15$ m) en fonction de l'azimut [10] :



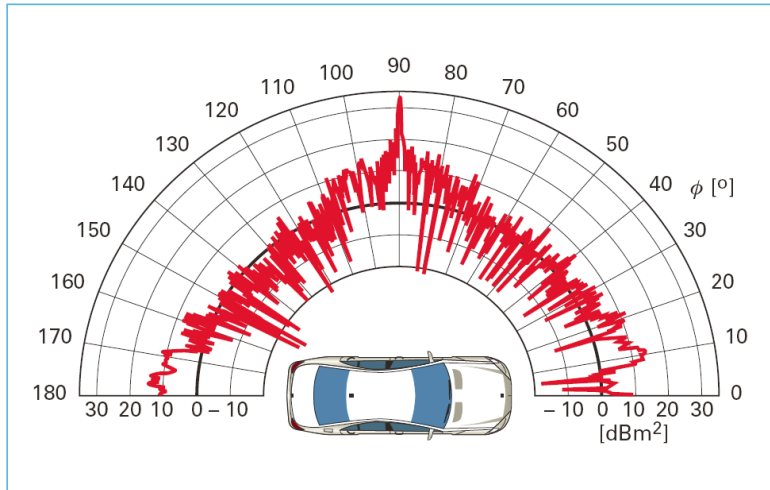
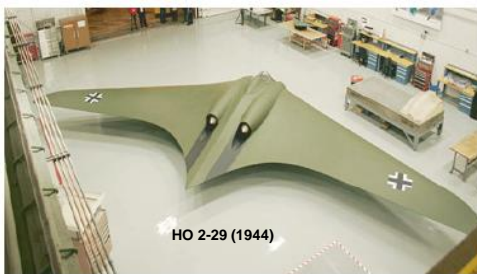


Figure 38 – SER d'une voiture calculée à 10 GHz [13]





Espadon, un démonstrateur de drone de surface qui embarque des drones sous-marins - DCNS

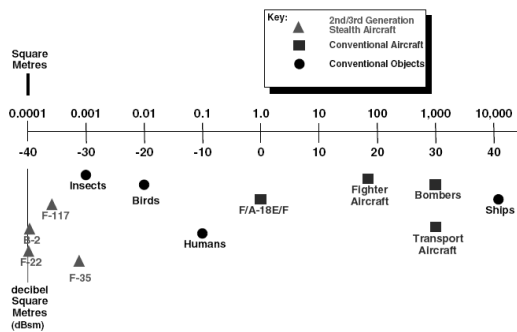


Tableau 2 – SER estimée de quelques objets volants

Objet	SER (m ²)	SER (dB · m ²)
B-52	100	20
F-15 Eagle	30	15
B-1A, SR 71	10	10
MIG 21	4	6
F-16, F-18	1,2	0
Rafale, MIG 29, B-1B	0,75	-2
SR-71 Blackbird	0,014	-18
Oiseau	0,01	-20
F-22 Raptor	0,006	-22
F-117 Nighthawk	0,003	-25
B-2 Spirit, Insecte	0,0014	-30

- Exercice 4 : Radar automobile courte portée
 - Pour améliorer la sécurité des véhicules en encourageant la mise au point et le déploiement des technologies utilisant des systèmes radar à courte portée pour automobile, la Commission Européenne a désigné et mis à disposition, en 2004, la bande de fréquences des 79 GHz.
 - Néanmoins, la technologie dans la bande de fréquences des 79 GHz est encore en cours de mise au point et n'est pas immédiatement disponible d'une façon qui assure la couverture des coûts.
 - Une décision en 2005, permet l'utilisation de systèmes radar dans la bande des 24 GHz uniquement lorsqu'ils sont installés d'origine dans de nouveaux véhicules ou lorsqu'ils remplacent un système installé d'origine et pour une période s'achevant au 30 juin 2013 au plus tard.
 - En considérant que la même antenne est utilisée à l'émission et à la réception ($G = 30$ dB) et que la PIRE autorisée est de -10 dBm, **calculer la puissance reçue par le radar si un obstacle ($\sigma = 3$ m²) se trouve à la distance de 50 m, pour les deux fréquences possibles.**



INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATIONS DE RENNES

V. Principaux types de radar

Logos: CNRS, INSA, Supélec, Université de Rennes 1, IETR

- 3 principaux types de radar :
 - Radar à ondes continues,
 - Radar à ondes pulsées,
 - Radar de poursuite.

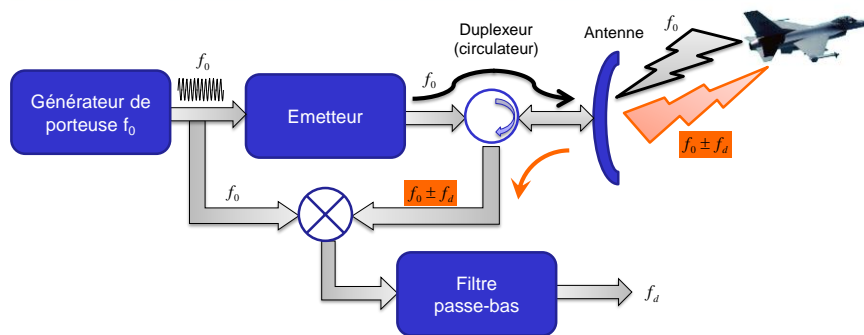
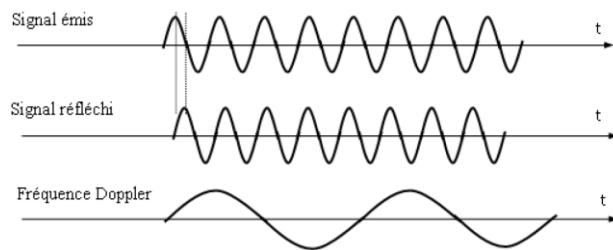
INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET
DE TELECOMMUNICATIONS
DE RENNES

V.1. Radar à ondes continues (CW)

Cnrs
INSA
Supélec
UNIVERSITÉ DE
RENNES 1

IETR
INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATIONS DE RENNES

- CW : **Continuous Wave**.
- Objectif :
 - Mesure de la vitesse de la cible.
- Principe :
 - Emission d'un signal d'amplitude et de fréquence constante, puis mesure du décalage de phase (décalage de fréquence) du signal renvoyé par la cible :
 - Effet Doppler.



- Mesure de la fréquence Doppler f_d par analyse spectrale :
 - Bonne précision en fréquence (δf) \rightarrow Temps de mesure (T) important.
 - Incertitude sur l'estimation de la vitesse :

$$\delta_f = \frac{1}{T} \quad \rightarrow \quad \delta_v = \frac{\lambda}{2} \cdot \delta_f = \frac{\lambda}{2 \cdot T}$$

- Principe :
 - Estimation de la distance par la mesure de la différence de phase entre les signaux émis et reçus.
- Signal émis : $S_e = A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$
- Signal reçu : $S_r = A' \cdot \sin[\omega_0 \cdot (t - T)] = A' \cdot \sin[\omega_0 \cdot t - \varphi]$ avec $\varphi = \omega_0 \cdot \frac{2 \cdot R}{c}$
- Estimation de la distance :

$$R = \frac{c}{2 \cdot \omega_0} \cdot \varphi = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \cdot \varphi$$
- Ambiguïté en distance : $\varphi < 2 \cdot \pi \rightarrow R_{\max} = \frac{\lambda}{2}$
- Exemple :
 - $f = 3 \text{ GHz} \rightarrow R_{\max} =$

- Avantage :
 - Mesure de la fréquence Doppler :
 - **Obtention de la vitesse radiale de la cible.**
- Inconvénient :
 - **Impossibilité de mesurer la distance.**
- Nécessité d'introduire des repères :
 - Emission multifréquence,
 - Modulation linéaire de la fréquence,
 - ...

- Principe :
 - Emission simultanée de plusieurs fréquences,
 - **Estimation de la distance par la mesure de la différence de phase entre les fréquences.**

- Expression des signaux :

$$\begin{cases} S_{e_1} = \sin(\omega_1 t) \\ S_{e_2} = \sin(\omega_2 t) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} S_{r_1} = \sin[\omega_1 t - \varphi_1] \text{ avec } \varphi_1 = \omega_1 \cdot \frac{2.R}{c} \\ S_{r_2} = \sin[\omega_2 t - \varphi_2] \text{ avec } \varphi_2 = \omega_2 \cdot \frac{2.R}{c} \end{cases}$$

- Après démodulation et filtrage :

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4.\pi.R}{c} (f_2 - f_1) \longrightarrow R = \frac{c.\Delta\varphi}{4.\pi.\Delta f}$$

- Ambiguïté en distance : $R_{\max} = \frac{c}{2.\Delta f}$

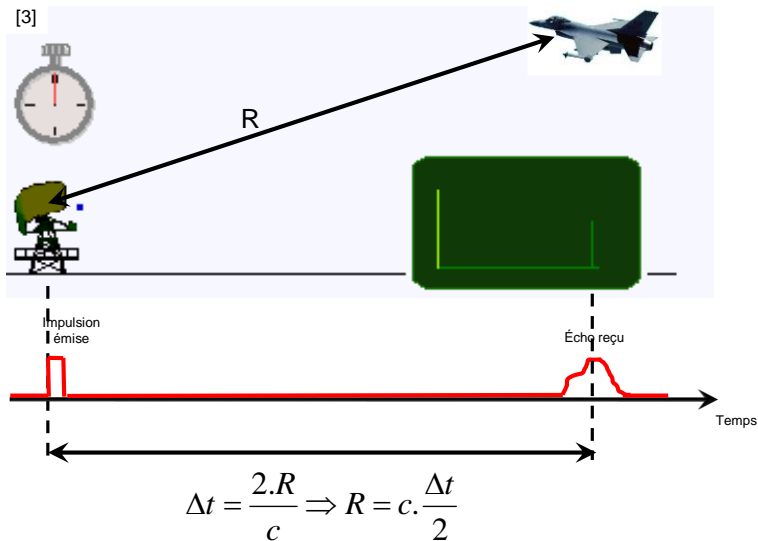
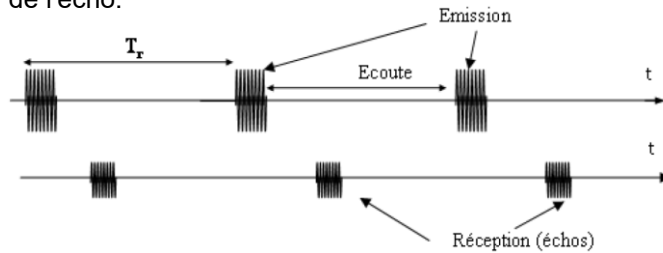
- Exemple : $\Delta f = 1 \text{ kHz} \rightarrow R_{\max} =$

INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATIONS DE RENNES

V.2. Radars à impulsions

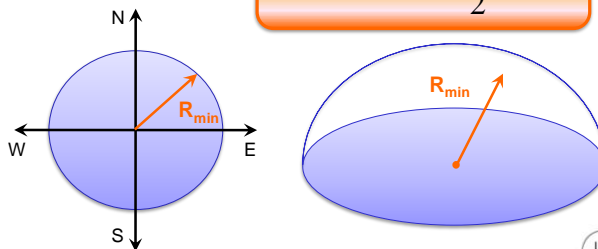
INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATIONS DE RENNES

- Radar « Pulse – Doppler ».
- Objectif :
 - Mesure de la distance radar – cible,
 - Mesure de la vitesse de la cible.
- Principe :
 - Emission d’une impulsion de courte de durée puis mesure du temps de retour de l’écho.

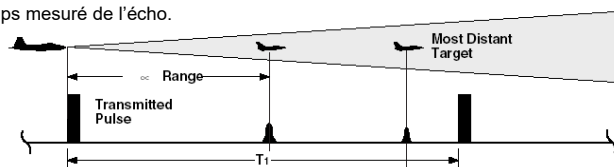


- Difficulté : Impossibilité de recevoir pendant la durée T_i de l'émission.
 - Protection du récepteur.
- Réception impossible si : $\Delta t < T_i$ avec $\Delta t = \frac{2.R}{c}$
 - Distance aveugle théorique : $R_{min} = c \cdot \frac{T_i}{2}$ (ex : $T_i = 1 \mu s \rightarrow R_{min} =$)
 - **Distance aveugle pratique :**

$$R_{min} = c \cdot \frac{(T_i + t_{commutation})}{2}$$

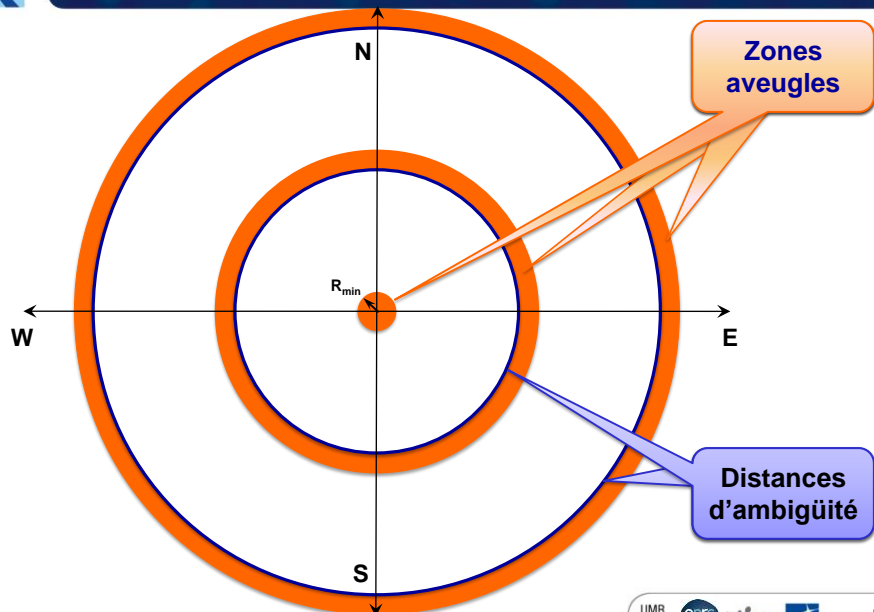


- **Distances ambiguës** : Distances correspondant à des échos arrivant après l'impulsion d'émission suivante.
- Ambigüité si : $\Delta t > T_r$
 - Avec :
 - T_r , Période de récurrence des impulsions,
 - Δt , le temps mesuré de l'écho.



- **Distances ambiguës** pour un train d'impulsions émises :
 - Avec $\alpha = 1, 2, 3, \dots$, le numéro d'ordre de l'impulsion émise.

$$R_{amb} = \alpha \cdot c \cdot \frac{T_r}{2}$$



- Emission périodique de fréquence f_r (récurrence), d'un signal de fréquence f_0 :
 - Echantillonnage du signal f_0 à la fréquence f_r :
 - Périodisation du spectre émis.**



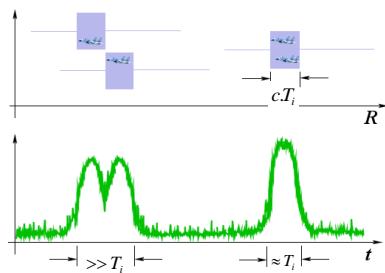
- Ambiguïté en fréquence : $f_d > \frac{f_r}{2}$
- Ambiguïté en vitesse :
$$v_0 = \pm \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{f_r}{2}$$
- A.N. :
 - $v_{r_{max}} = 150 \text{ m/s}$, $\lambda = 10 \text{ cm}$ $\rightarrow f_{d_{max}} =$

$$\rightarrow f_r <$$

Paramètres	Valeurs
Distance d'ambigüité	$R = \frac{c}{2 \cdot f_r}$
Vitesse d'ambigüité	$v_0 = \pm \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{f_r}{2}$

➔ **Compromis nécessaire sur la fréquence de récurrence.**

PRF	Distance	Vitesse
Elevée	Ambigüe	Non ambigüe
Moyenne	Ambigüe	Ambigüe
Faible	Non ambigüe	Ambigüe



- Intervalle de temps minimum pour séparer deux échos :

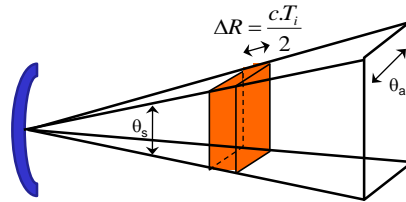
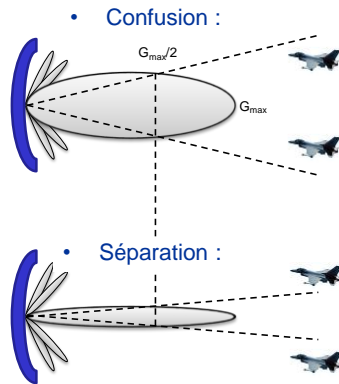
$$\Delta t_{\min} = T_i$$

- Résolution en distance ΔR :

$$\Delta R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_i = \frac{c}{2 \cdot B}$$

– A.N. : B = 1 MHz ➔ $\Delta R = ?$

- Cellule de résolution :
 - Volume compris entre 2 calottes sphériques distantes de $(c.T_i/2)$, limité par le cône à mi-puissance (- 3 dB) du lobe d'antenne d'émission.



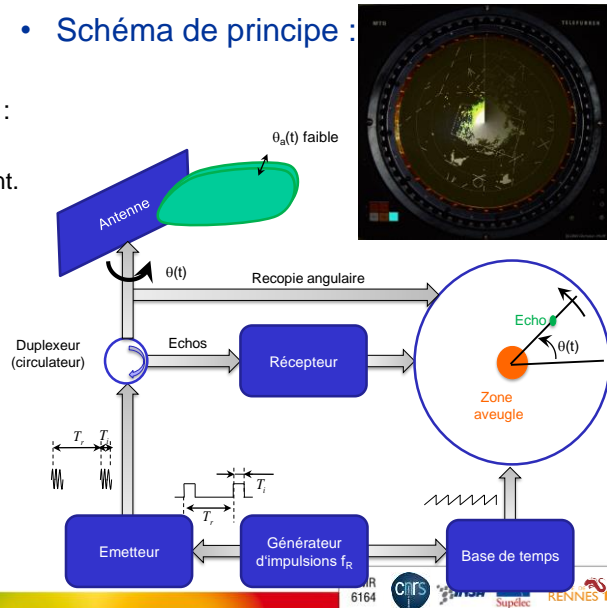
θ_a : Ouverture à mi-puissance en azimut,
 θ_s : Ouverture à mi-puissance en site,
 ΔR : Résolution en distance.

INSTITUT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATIONS DE RENNES

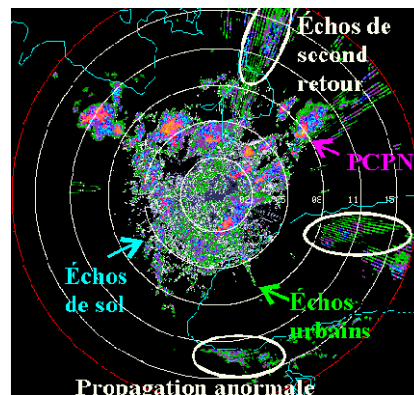
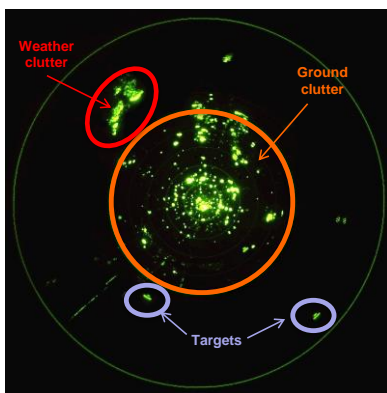
V.3. Radar de veille

- **Caractéristiques :**
 - Radar à impulsions,
 - Lobe d'antenne asymétrique :
 - Forte directivité en azimut,
 - Faible directivité en gisement.
 - Mouvement de rotation continue de l'antenne.

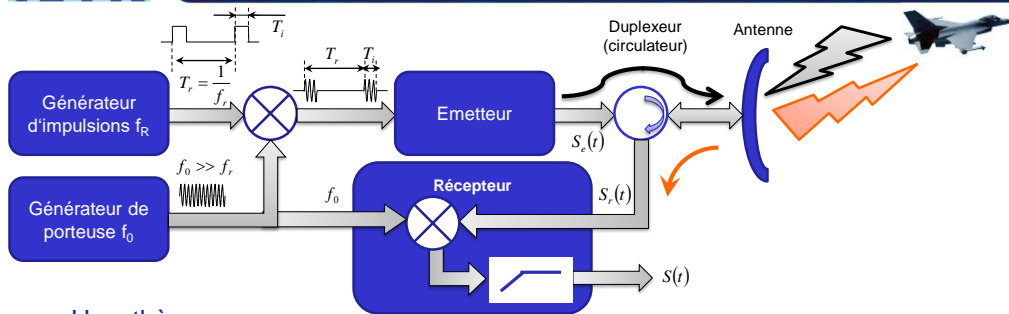
- **Schéma de principe :**



- **Echos mesurés :**
 - Fixes : clutter (végétation, immeubles, ...),
 - Mobiles : cibles (avions, véhicules, personnes, ...)



➡ Nécessité de circuits d'élimination d'échos fixes.



- Hypothèse :

- Cible en rapprochement à la distance $R = R_0 - v_r \cdot t$

- Détermination de $S(t)$: $S_e(t) = \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \Rightarrow S_r(t) = \cos\left[2\pi \cdot f_0 \cdot \left(t - \frac{2 \cdot R}{c}\right)\right]$

$$S_r(t) = \cos\left[2\pi \cdot f_0 \cdot t - \frac{4\pi \cdot f_0 \cdot R_0}{c} + \frac{4\pi \cdot f_0 \cdot v_r \cdot t}{c}\right]$$

$$S(t) = \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\frac{4\pi \cdot f_0 \cdot R_0}{c} + \varphi + \frac{4\pi \cdot f_0 \cdot v_r \cdot t}{c}\right)$$

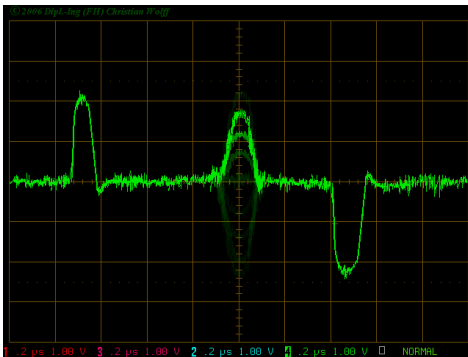
$$S(t) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\varphi_0 + 2\pi \cdot f_d \cdot t)$$

Modulation due au Doppler (écho mobile)

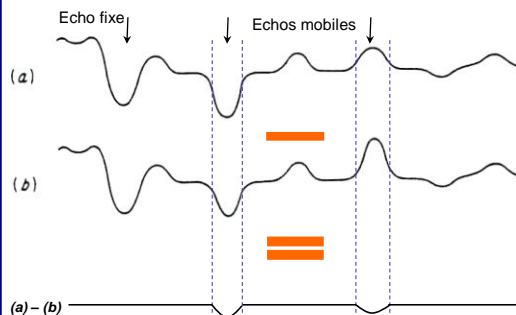
Phase constante (écho fixe)

65

- Cible mobile : $S(t) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\varphi_0 + 2\pi \cdot f_d \cdot t)$
- Cible fixe : $S(t) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\varphi_0)$

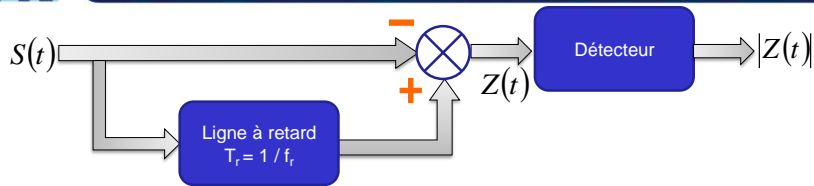


- Principe de l'élimination d'échos fixes :



➔ Circuit **M.T.I.**
(Moving Target Indicator).

66



- Pour une impulsion reçue, on obtient : $Z(t) = S(t - T_r) - S(t)$

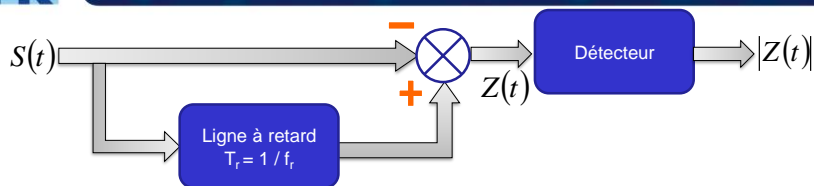
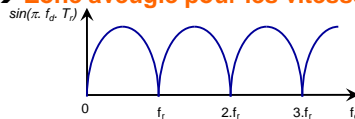
$$Z(t) = \frac{1}{2} \cdot \{ \cos[2\pi \cdot f_d \cdot (t - T_r) + \varphi_0] - \cos(2\pi \cdot f_d \cdot t + \varphi_0) \}$$

$$|Z(t)| = |\sin(\pi \cdot f_d \cdot T_r) \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t - \pi \cdot f_d \cdot T_r + \varphi_0)|$$

- $|Z(t)| = 0$ pour $\sin(\pi \cdot f_d \cdot T_r) = 0$:

- $f_d = 0 \rightarrow$ **Elimination des échos fixes**,
- $\pi \cdot f_d \cdot T_r = n \cdot \pi \rightarrow f_d = n \cdot f_r \rightarrow$ **Zone aveugle pour les vitesses**

$$v_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{n \cdot f_r}{f_0}$$



$$|Z(t)| = |\sin(\pi \cdot f_d \cdot T_r) \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t - \pi \cdot f_d \cdot T_r + \varphi_0)|$$

- $|Z(t)| = 0$ pour $\sin(2\pi \cdot f_d \cdot t - \pi \cdot f_d \cdot T_r + \varphi_0) = 0$:

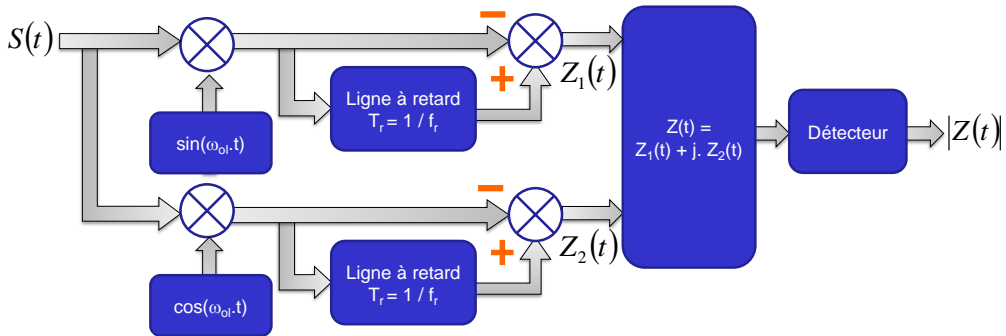
- Phénomène de **phases aveugles**,
- Annulation du signal à des instants particuliers :

$$2\pi \cdot f_d \cdot t - \pi \cdot f_d \cdot T_r + \varphi_0 = k \cdot \pi \Rightarrow t = \frac{k}{2 \cdot f_d} + \frac{T_r}{2} - \frac{\varphi_0}{2 \cdot \pi \cdot f_d}$$

- **Solution :**

- Circuit MTI avec démodulateur 2 voies en quadrature.

- Circuit MTI avec démodulateur 2 voies en quadrature :

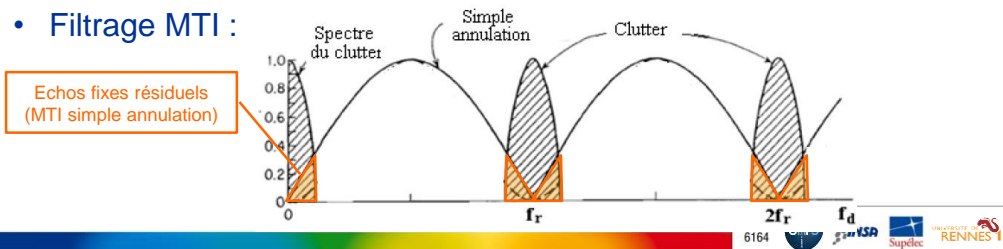


$$\begin{aligned} Z_1(t) &= -\sin(\pi.f_d.T_r)\cos(2\pi.f_d.t - \pi.f_d.T_r + \varphi_0) \\ Z_2(t) &= +\sin(\pi.f_d.T_r)\sin(2\pi.f_d.t - \pi.f_d.T_r + \varphi_0) \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} Z(t) &= \sin(\pi.f_d.T_r)[-\cos(2\pi.f_d.t - \pi.f_d.T_r + \varphi_0) \\ &\quad + j.\sin(2\pi.f_d.t - \pi.f_d.T_r + \varphi_0)] \end{aligned}$$

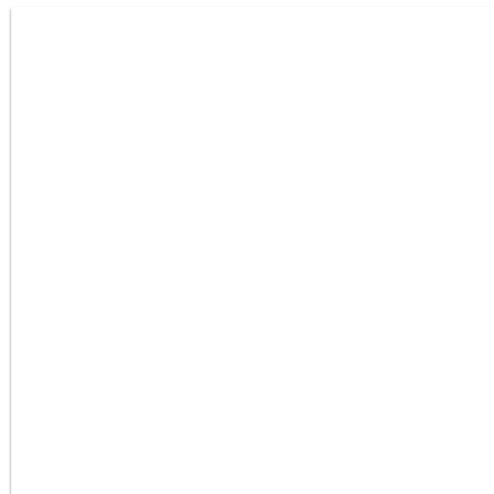
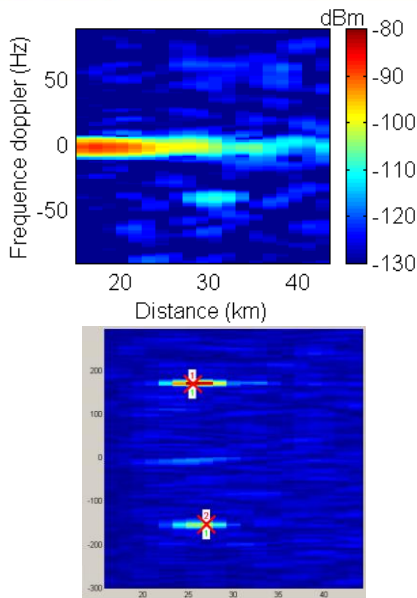
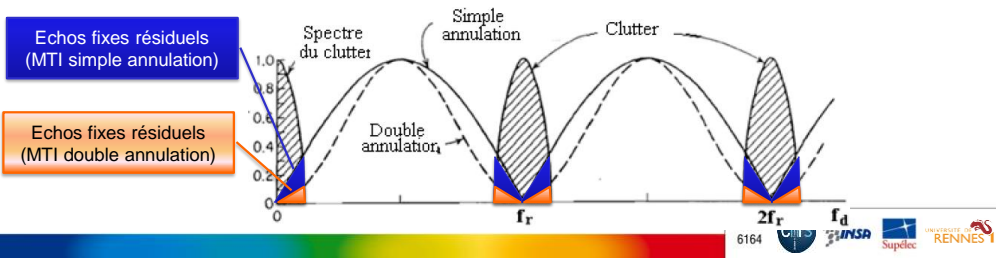
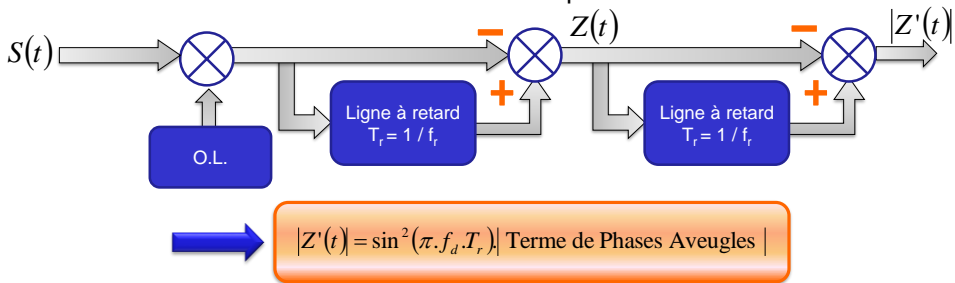
$$\longrightarrow Z(t) = -\sin(\pi.f_d.T_r)\exp j(2\pi.f_d.t - \pi.f_d.T_r + \varphi_0) \quad \longrightarrow \quad |Z(t)| = |\sin(\pi.f_d.T_r)|$$

- Remarques :
 - Problème des fréquences Doppler aveugles : Choix de $f_r \gg f_{d,max}$
 - Distances ambiguës : $R = \frac{c}{2.f_r}$
 - **Incompatibilité entre vitesses non-ambiguës élevées et distances non-ambiguës élevées.**
 - Annulation totale du « clutter » pour $f_d = 0$:
 - En réalité, les échos fixes ont un « léger » étalement Doppler :
 - Influence du vent, houle de la mer, ...

- Filtrage MTI :



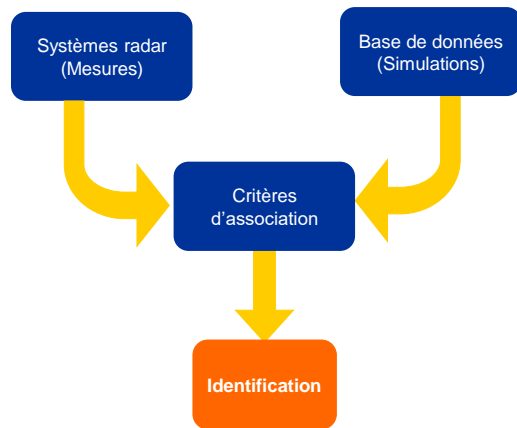
- MTI double annulation :
 - Mise en cascade de deux filtres MTI simple annulation



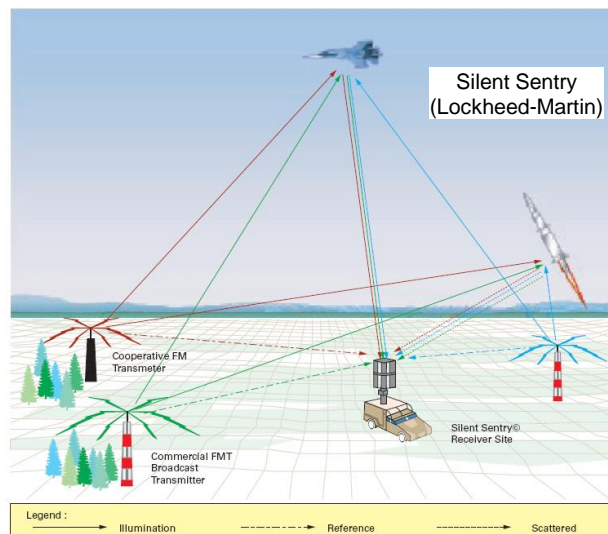
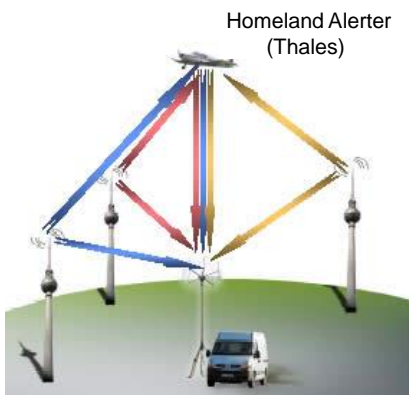
VI. Conclusions & Perspectives

- Capacités requises pour les radars modernes :
 - Détection,
 - Localisation,
 - Identification.
- Difficultés :
 - Furtivité croissante des cibles,
 - Environnements de plus en plus complexes.
- Perspectives :
 - Traitement du signal pour la classification / l'identification,
 - Formes d'ondes évoluées :
 - Amélioration de la résolution en distance et en vitesse.
 - Indétectabilité,
 - Lutte contre la furtivité.

- Principe :
 - Association d'une signature inconnue à une signature connue contenue dans une base de données.
- Critères d'association :
 - Amplitude, phase, décalage Doppler, profil distance, image radar, ...
- Algorithme d'association :
 - Plus proche voisin,
 - Réseaux de neurones,
 - ...



- Principe :



VII. Références Bibliographiques

- [1] : M. Skolnik, « Introduction to Radar Systems », McGraw-Hill Company, 2001.
- [2] : SPARTE 500 L/S/C - Tracking Antennas, Safran, https://www.safran-group.com/sites/default/files/2021-05/col100003.4.0_sparte500_a4_6.pdf
- [3] : <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/07.naval/karte005.fr.html>
- [4] : https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/effet_Doppler/44451
- [5] : <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/le-radar-ca-fait-des-vagues>
- [6] : Y. Blanchard, « Le Radar (1994 – 2004) : Histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles », Editions Ellipses, 2004.
- [7] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_du_radar
- [8] : Météo France, <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>
- [9] : <https://scanplustech.ca/scan-de-beton-avec-georadar-histoire-et-utilisations/>
- [10] : A. David, C. Brousseau, A. Bourdillon, « Simulations and Measurements of Radar Cross Section of a Boeing 747 – 200 in the 20 – 60 MHz Frequency Band », Radio Science, Vol.38, N°4, juillet - août 2003.
- [11] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_bistatique
- [12] : https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Radar_multistatique
- [13] : F. Auzanneau, « Furtivité électromagnétique », Techniques de l'ingénieur, TE 6 712, 2011.
- [7] : B.R. Mahafza, « Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB », Chapman & Hall/CRC Company, 2005.
- [8] : E.F. Knott, « Radar Cross Section », Second Edition, Artech House, 1993.
- [9] : J.W. Crispin, K.M. Siegel, « Methods of Radar Cross Section Analysis », Academic Press, 1968.
- [10] : A.W. Rihaczek, « Principles of High-Resolution Radar », McGraw-Hill Company, 1969.



INSTITUT D'ÉLECTRONIQUE ET DE TÉLÉCOMMUNICATIONS DE RENNES

Université de Rennes 1
Campus de Beaulieu, Bât. 11 D
263, Av. du Général Leclerc
35042 Rennes Cedex, France

www.ietr.com

