



# Introduction et Généralités sur les Radar

Théorie de la propagation et des interactions  
des ondes électromagnétiques avec leur milieu  
Exemples d'applications



Aix-Marseille  
université



UNIVERSITÉ  
DE TOULON

Céline Quentin, Atelier radar – Rennes – 17/10/2023

## Généralités sur les systèmes RADAR

Une petite introduction à l'électromagnétisme avec :

- les lois de l'électromagnétisme
- les ondes électromagnétiques
- le spectre électromagnétique
- la propagation dans l'atmosphère
- les systèmes antennaires, leurs caractéristiques

Et quelques exemples de radars pour l'environnement



Aix-Marseille  
université



UNIVERSITÉ  
DE TOULON

Céline Quentin, Atelier radar – Rennes – 17/10/2023

Diapositive n°2

# RADAR *R*Adio *D*etection *A*nd *R*anging

Détection et mesure des distances par ondes radioélectriques



# RADAR *R*Adio *D*etection *A*nd *R*anging

Détection et mesure des distances par ondes radioélectriques

## Tx : EMETTEUR

- **générateur de signaux**  
génère l'onde radioélectrique selon une forme définie
- **guide d'onde**  
conduit l'onde à l'antenne (fibre optique ou câble coaxial)
- **système antenne**  
d'où rayonne l'onde électromagnétique avec le minimum de perte d'énergie et avec une directivité connue

## Rx : RECEPTEUR

- **système antenne**  
reçoit des signaux radioélectriques
- **récepteur**  
analogique/numérique, filtre les bruits, amplifie le signal, prétraitement
- **analyseur de signaux**  
effectue le traitement d'antennes, et extrait du signal des données utiles à l'opérateur  
(détection, suivi et identification de cible ou des paramètres environnementaux)

## Cible:

**Objet d'intérêt** qui peut être **ponctuel** (ou compact comme un véhicule, avion, navire, ...) ou **étendu** (cellule de pluie, surface de la mer, couvert végétal, ...)

## RADAR monostatique

les systèmes antennes d'émission et de réception sont localisés au même endroit, ou sont identiques. Le même système antenne peut-être sollicité tant en émission qu'en réception.

## RADAR bi-statique

Les antennes sont éloignées en distance. L'électronique d'émission et de réception sont séparées. L'utilisation d'une configuration bi-statique (ou multistatique) demande une bonne synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. Le récepteur est totalement passif, donc moins facilement détectable.

# Lois générales de électromagnétisme

Les charges électriques produisent dans tout l'espace un champ électrique  $\vec{E}$   
 et les courants électriques un champ magnétique  $\vec{B}$   
 Lorsque les charges et/ou les courants évoluent au cours du temps cela produit à la fois  
 un champ électrique et magnétique (phénomène d'induction)

L'équation de Maxwell-Gauss reliée au théorème de Gauss en électrostatique, décrit comment un champ électrique est engendré par des charges électriques : le champ électrique est orienté des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée avec la charge électrique contenue dans le volume délimité par cette surface

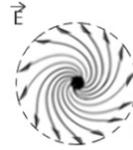


$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(Maxwell-Gauss)

Le flux du champ électrique  $\vec{E}$  sortant d'une surface fermée est égal à la somme algébrique des charges comprises dans le volume délimité par la surface ( $\rho$  la densité volumique de charges), divisée par la  $\epsilon_0$  **permittivité diélectrique du vide**

L'équation de Maxwell-Faraday reliée à la loi d'induction de Faraday, décrit comment la variation d'un champ magnétique peut créer (induire) un champ électrique.



$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

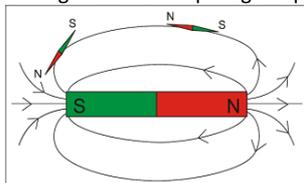
(Maxwell-Faraday)

La circulation du champ électrique autour d'un chemin fermé quelconque C (force électromotrice) est égale à la contre-variation temporelle du flux magnétique à travers toute surface s'appuyant sur ce contour. Le signe "-" traduit le principe de la **loi de Lenz** : la force électromotrice induite produit toujours un flux opposé à celui qui l'a créé.

# Lois générales de électromagnétisme

Les équations de Maxwell sous forme locale (suite) ...

La formule de Maxwell-Flux stipule que la divergence du champ magnétique est nulle



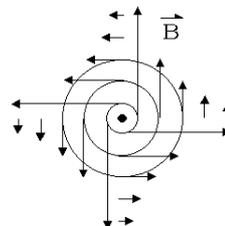
$$\text{div}(\vec{B}) = 0$$

(Maxwell-Flux)

Le champ magnétique est engendré par une configuration nommée dipôle, qui n'a pas de charge magnétique mais regroupe une charge positive et une charge négative reliées entre elles et inséparables.

À titre d'exemple, cela permet de montrer que le flux magnétique total à travers n'importe quelle surface fermée est nul, ou que le champ magnétique est un champ solénoïdal.

La formule de Maxwell-Ampère stipule que le rotationnel du champ magnétique dépend d'une variation du champ électrique au cours du temps  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  et dépend également d'un courant électrique  $\vec{j}$ , avec  $\mu_0$  la **perméabilité magnétique du vide**.



$$\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(Maxwell-Ampère)

# Les ondes électromagnétiques

Les équations de Maxwell sont des lois fondamentales de la physique qui se rapportent à l'électromagnétisme, et plus particulièrement à la description des phénomènes magnétiques, électriques, et lumineux. En résumé en l'absence de matière, dans le vide, on retient :

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Maxwell-Gauss) (Maxwell-Faraday)

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad \operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(Maxwell-Flux) (Maxwell-Ampère)

## Équation de propagation du champ électromagnétique

Le champ électromagnétique ( $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ) vérifie l'équation :

$$\Delta\{\vec{E}, \vec{B}\} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\{\vec{E}, \vec{B}\}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

avec  $\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$

<https://jeretiens.net/les-4-equations-de-maxwell/>

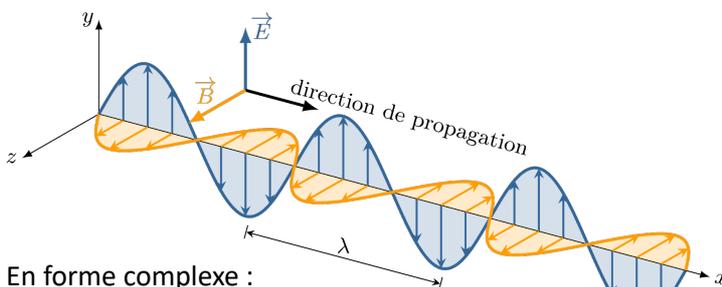
<https://www.techniques-ingenieur.fr/> (\*gratuit sur inscription)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations\\_de\\_Maxwell](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Maxwell)

<https://femto-physique.fr/electromagnetisme/ondes-em.php>

# L'onde plane progressive harmonique ou monochromatique

L'onde plane est une solution unidimensionnelle de l'équation de propagation des ondes électromagnétiques. Par définition, une onde plane progressive harmonique est de la forme:



En forme complexe :

$$Ae^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)} = \underbrace{Ae^{i\varphi}}_{\text{Amplitude complexe}} e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(k(x - ct))$$

$k$  est appelé **nombre d'onde**

$$\omega = kc \quad \text{est la pulsation}$$

$$T = 2\pi/\omega \quad \text{est la période temporelle}$$

$$\lambda = cT = \frac{2\pi}{k} \quad \text{est la longueur d'onde}$$

Le vecteur d'onde est un vecteur noté  $\vec{k}$  qui présente les propriétés suivantes :

- sa norme donne le nombre d'onde :  $|\vec{k}| = k = 2\pi/\lambda$ ;
- son orientation est donnée par le sens de propagation.

# La polarisation

La polarisation d'une antenne est en fait la polarisation de l'onde émise par celle-ci. On la définit en décrivant la façon dont se propage le vecteur  $\mathbf{E}$ .

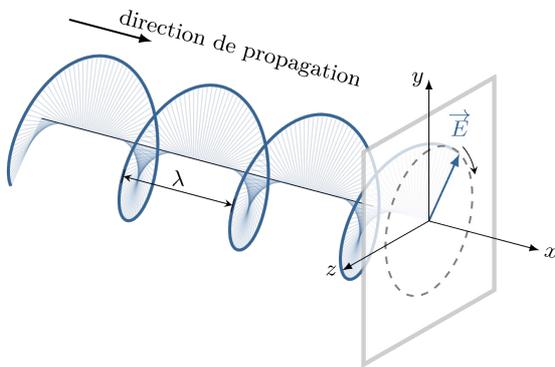


Schéma de la polarisation circulaire droite

## Polarisation rectiligne ou linéaire :

La polarisation de l'onde est dite rectiligne ou linéaire lorsque le champ électrique  $\mathbf{E}$  se propage en maintenant une direction constante dans le temps

## Polarisation circulaire :

La polarisation de l'onde est dite circulaire lorsque le champ électrique  $\mathbf{E}$  décrit une hélice à section droite circulaire au cours du temps. Si on projette l'extrémité de  $\mathbf{E}$  sur un plan orthogonal on obtient un cercle. Ce cercle peut être décrit en fonction du temps dans un sens ou dans l'autre : on parle alors de polarisation circulaire droite ou gauche.

## Polarisation elliptique :

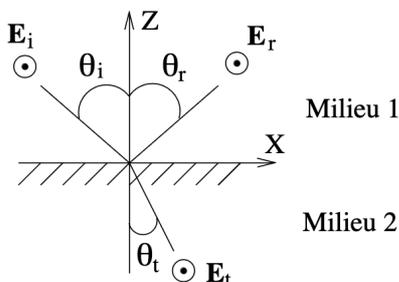
Dans ce cas, l'extrémité du vecteur  $\mathbf{E}$  décrit une ellipse lorsque de sa projection dans un plan orthogonal à la propagation. Comme pour la polarisation circulaire, on distingue la polarisation elliptique droite et gauche.

# Réflexion, et transmission

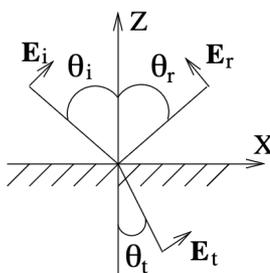
## Lois de Snell-Descartes

- les rayons incidents, réfléchis, réfractés et la normale à la surface de séparation des 2 milieux appartiennent au même plan
- les angles d'incidence et de réflexion sont égaux
- les angles d'incidence et de réfraction (transmission) sont reliés par :

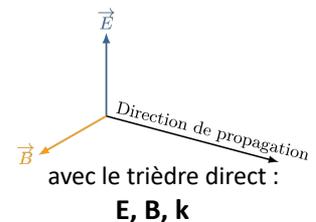
$$\beta_1 \sin \theta^i = \beta_1 \sin \theta^r = \beta_2 \sin \theta^t \quad \text{avec} \quad \beta_i = \omega \sqrt{\mu_i \epsilon_i}$$



**Polarisation TE**  
Transverse électrique  
Le champ  $\mathbf{E}$  pointe vers nous

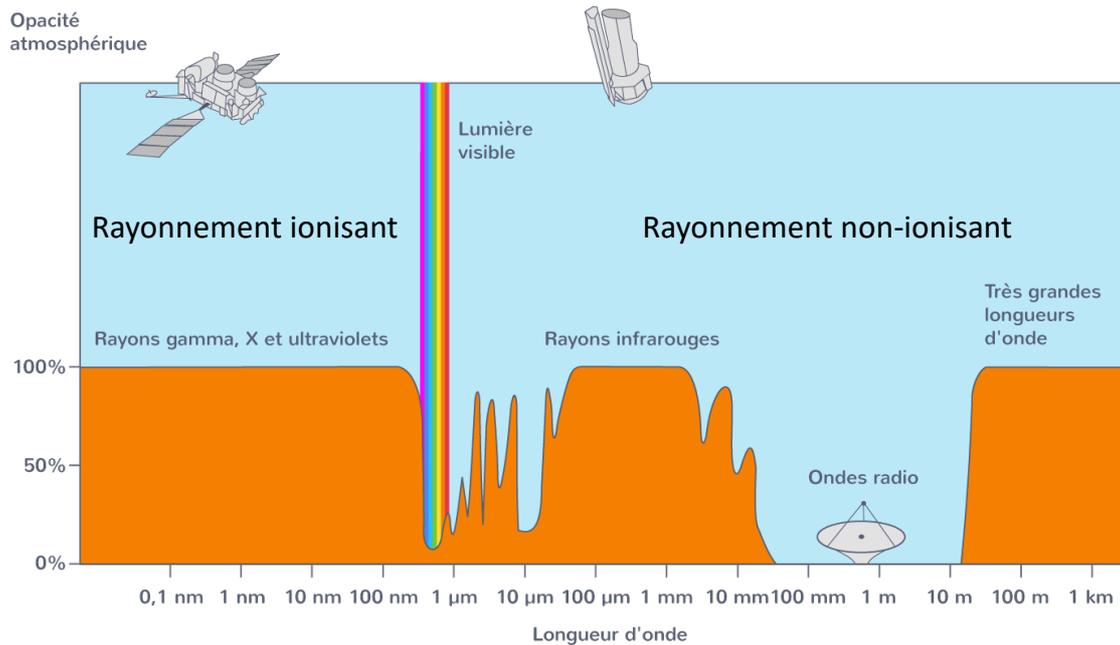


**Polarisation TM**  
Transverse magnétique  
Le champ  $\mathbf{B}$  pointe vers nous



➡ **Changement de polarisation**

# L'absorption dans l'atmosphère terrestre



# Caractéristiques des antennes

L'antenne est un élément fondamental dans un système radioélectrique, et ses caractéristiques de rendement, [gain](#), [diagramme de rayonnement](#) influencent directement les performances de qualité et de portée du système.

On caractérise une antenne par

- ses fréquences d'utilisation
- son diagramme de rayonnement
- son impédance d'antenne
- sa polarisation
- son rendement
- son encombrement mécanique
- sa puissance maximale tolérée en émission



Antennes Yagi-Uda



Radôme de Pleumeur-Bodou



Antenne UHF hybride planaire



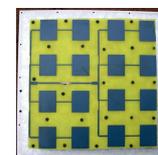
Antenne ferrite GO



Antenne à fentes



Dipôle hyperfréquence

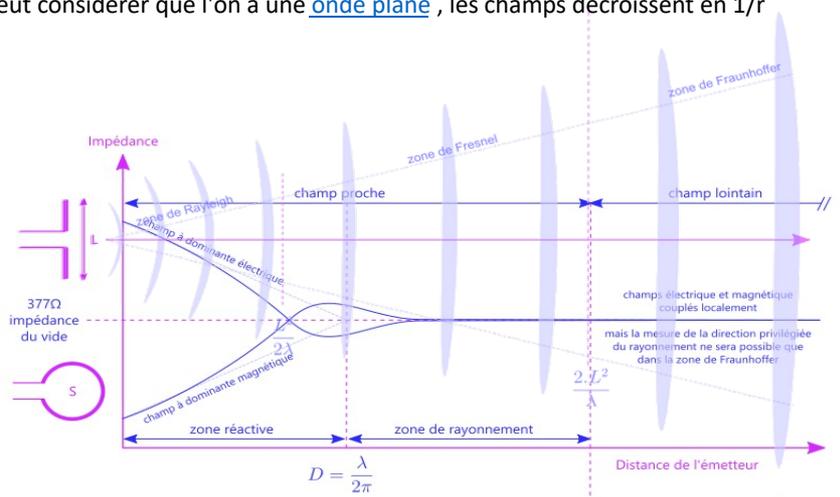


Réseau de 16 antennes patch 2,4 GHz

# Rayonnement électromagnétique

On distingue 3 zones:

- **zone de Rayleigh**: la **puissance** par unité de **surface** décroît peu en fonction de la distance
- **zone de Fresnel**: on constate que le rapport E/H s'est équilibré à 377 ohms, mais on observe des variations importantes des champs
- **zone de Fraunhofer** (ou champs lointain): dans cette zone, qui s'étend jusqu'à l'infini, on peut considérer que l'on a une **onde plane**, les champs décroissent en 1/r



## Le dipôle demi-onde

Un dipôle court est un dipôle réalisable pratiquement formé par deux conducteurs de longueur totale  $\ell$  (très petite devant la longueur d'onde  $\lambda$ ). Le dipôle demi-onde ( $\ell = \lambda/2$ ) est l'antenne résonante la plus utilisée pour les télécommunications modernes. La répartition de la valeur efficace du courant pour ce type d'antenne est supposée sinusoïdale

Si la distance de mesure du **champ** est beaucoup plus grande que la longueur d'onde, elle-même plus grande que la longueur du dipôle, nous donnons directement l'expression du champ électrique lointain (en V/m) :

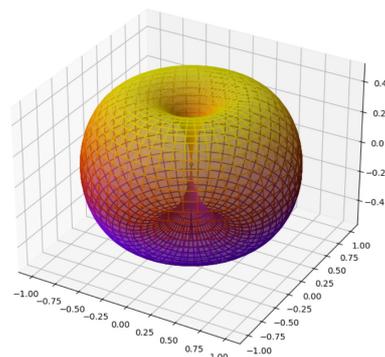
Les composantes du champ rayonné sont exprimées par :

$$E_{\theta} = j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left( \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right)$$

La fonction caractéristique normalisée est donnée par :

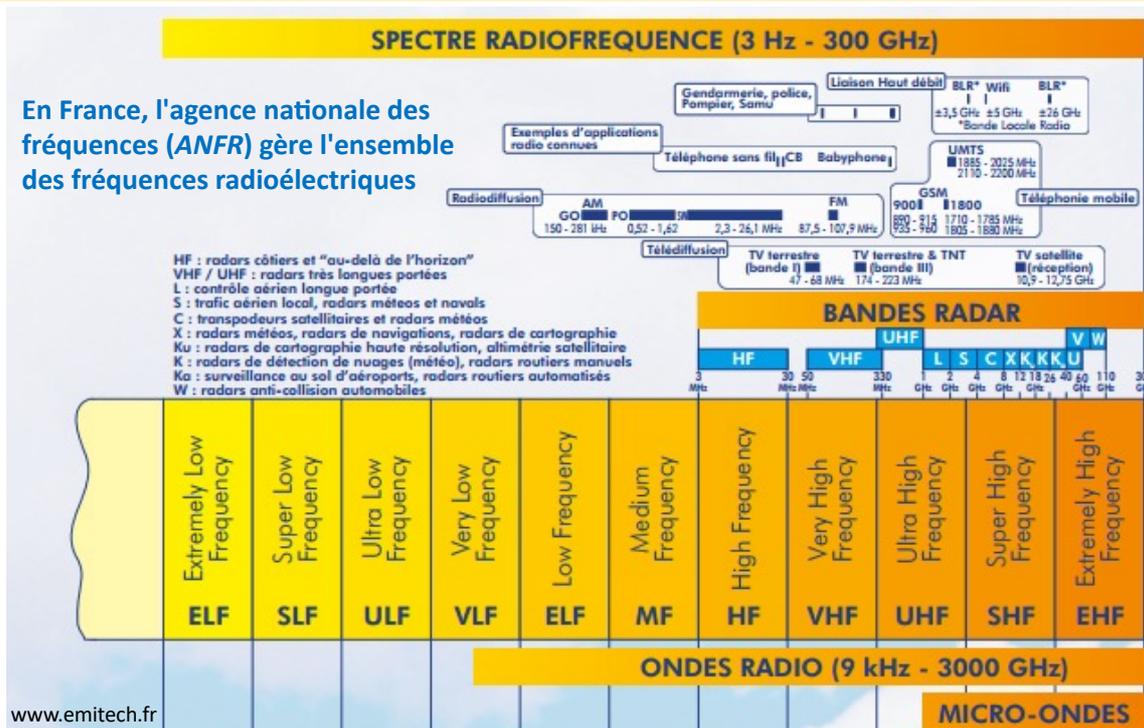
$$r(\theta) = \left( \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right)^2$$

Diagramme de rayonnement d'un dipôle (en 3D)





# Le spectre électromagnétique



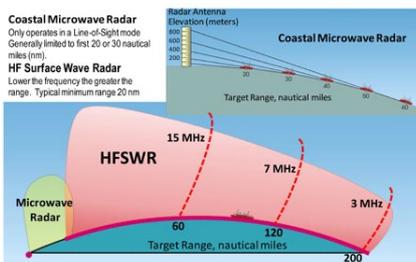
## Plages de fréquences radar

Nom de bande	Plage de fréquences	Longueurs d'onde	Commentaires
HF	3-30 MHz	10-100 m	Pour <b>high frequency</b> (haute fréquence). Utilisée par les radars côtiers et les radars "au-delà de l'horizon".
P	< 300 MHz	1 m+	Pour <b>précédent</b> : appliquée <i>a posteriori</i> aux radars primitifs
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Pour <b>very high frequency</b> (très haute fréquence). Utilisée par les radars à très longue portée et par ceux à pénétration de sol.
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Pour <b>ultra high frequency</b> (ultra haute fréquence). Radars à très longue portée (ex. détection de missiles balistiques), pénétration de sol et de feuillage.
L	1-2 GHz	15-30 cm	Pour <b>long</b> . Utilisée pour le <b>contrôle</b> aérien de longue portée et la surveillance aérienne, le GPS (et donc les radars passifs se basant dessus).
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Pour <b>short</b> (court). Utilisée par les radars de trafic aérien local, les radars météorologiques et navals.
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Compromis entre les bandes S et X pour les transpondeurs satellitaires et les radars météorologiques.
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Pour les radars météorologiques, les autodirecteurs de missiles, les radars de <b>navigation</b> , les radars à résolution <b>moyenne</b> de <b>cartographie</b> et la surveillance au sol des aéroports.
K <sub>u</sub>	12-18 GHz	1,67-2,5 cm	Fréquence juste sous K (indice 'u' pour <i>under</i> en anglais) pour les radars de cartographie à haute résolution et l'altimétrie satellitaire.
K	18-27 GHz	1,11-1,67 cm	De l'Allemand <b>kurz</b> (court). Très absorbées par la <b>vapeur</b> d'eau, K <sub>u</sub> et K <sub>a</sub> sont utilisées pour la détection des gouttelettes de nuages en <b>météorologie</b> et dans les radars routiers (24.150 ± 0.100 GHz) manuels.
K <sub>a</sub>	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	Fréquence juste au-dessus de K (indice 'a' pour "above" en anglais) pour la cartographie, la courte portée, la surveillance au sol des aéroports, les radars routiers (34.300 ± 0.100 GHz) automatisés, et les radars anti-collision montés sur les voitures haut de gamme.

# Exemples de RADAR

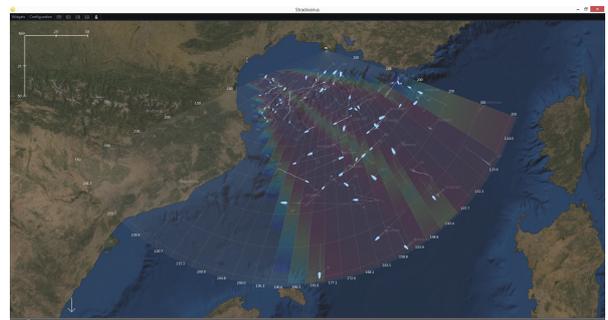
- **HF** : radio océanographie et radiolocalisation transhorizon
- P: pénètre la végétation
- **VHF** : profileurs de vent
- UHF : radioastronomie
- L : végétation, salinité (SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity satellite)
- S : sémaphore surveillance
- C : premiers altimètres
- X : hydrométéores
- Ku: Kuros (CFOsat)
- K : radars routiers
- Ka : Saral/altiKa altimétrie satellitaire

## Radiolocalisation Transhorizon



Crédit © FrontLine Defence 2012

Les radars transhorizon peuvent mener des études ionosphériques, dresser l'état de la mer ou des courants marins, repérer et suivre des bateaux en perdition, détecter des météorites.



© Diginext (CS group)

Le démonstrateur **Stradivarius** est capable de surveiller des zones maritimes jusqu'à 200 nautiques des côtes.



© ONERA

Implantation d'un réseau d'antennes transhorizon, base **Nostradamus** en forme d'étoile de trois bras d'environ 400 m de long, chacun d'eux étant constitué de 96 antennes biconiques.

# Profileur de vent

Deux radar profileurs de vent du Centre de Recherches Atmosphériques de Lannemezan.

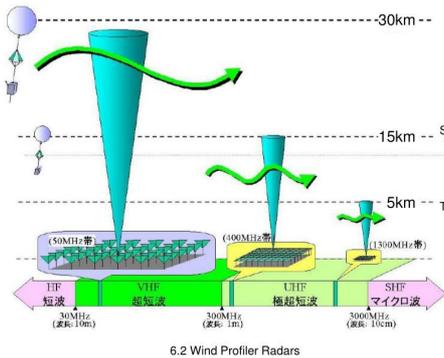
Solene Derrien  
Photography  
Lannemezan, France. 2010 ([m.ediha1-00643065](https://www.flickr.com/photos/ediha1-00643065/))



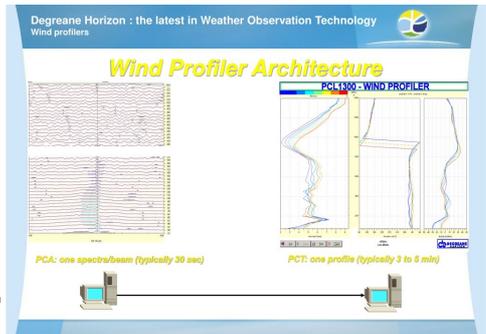
Le radar VHF (Very High Frequency) à 45MHz dont l'antenne co-co (colinéaire-coaxiale) est constituée par deux réseaux de câbles orthogonaux (60 x 60 m<sup>2</sup>).

Les mesures du radar S-T (stratosphère-troposphère) donnent accès à la dynamique atmosphérique de moyenne et grande échelle, dans la colonne troposphérique située au-dessus du radar.

Comparison 50, 400, 1300MHz



Naoki Tsukamoto Japan Meteorological Agency 17 Sep. 2009. Wind Profiler Radars. ITU/WMO Seminar on Use of Radio Spectrum for Meteorology: Weather, Water and Climate Monitoring and Prediction". Wind Profiler Radars. 6.2.



Le radar profileur de vent UHF (1300 MHz) permet de faire des sondages de la dynamique et de la thermodynamique en continu avec une cadence d'un profil chaque 5' dans des conditions d'air clair ou précipitant. La couverture verticale s'étend de 100 m à 5-6 km et la résolution verticale est de 75 m.



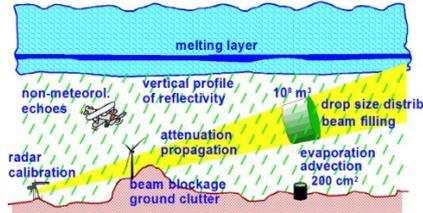
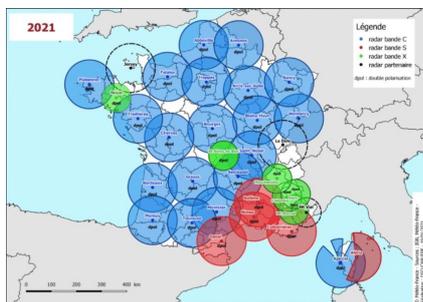
Céline Quentin, Atelier radar – Rennes – 17/10/2023

Diapositive n°21

# Réseau ARAMIS de Météo France

Réseau de radars météo de Météo-France (février 2021)

Il existe 20 radars en bande C, 5 radars en bande S, 6 radars en bande X (+2 aux aéroports de Paris CDG et de Nice). Le réseau est étendu avec 3 radars partenaires, dont un radar bande X à double polarisation exploité par la société NOVIMET. Source : Météo-France



Courtesy of Martin Hagen (DLR)

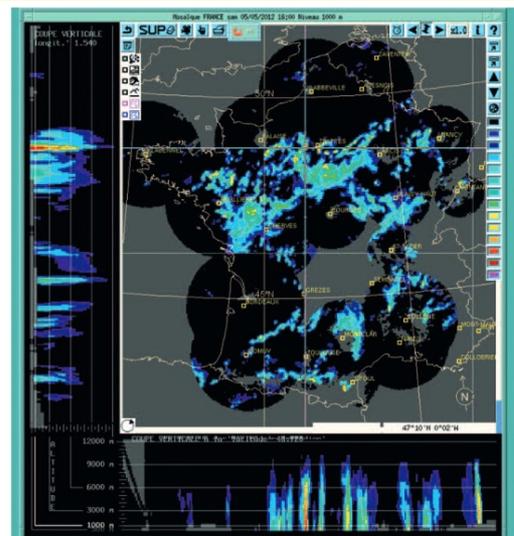


Figure 10. Exemple de champs 3D sur la France (5 mai 2012 à 16h00 TU) tel qu'il peut être visualisé sur le terminal des prévisionnistes de Météo-France (Synergie). Une coupe horizontale à 1000 m est présentée au centre. À gauche et en bas figurent respectivement une coupe verticale N-S et une coupe verticale O-E. Les lignes de coupes sont représentées sur la figure centrale ; leur point d'intersection est situé légèrement à l'ouest du radar de Trappes.

La Météorologie, 2013, N° 83 ; p. 15

Le réseau et les produits radars de Météo-France [10.4267/2042/52045](https://doi.org/10.4267/2042/52045)

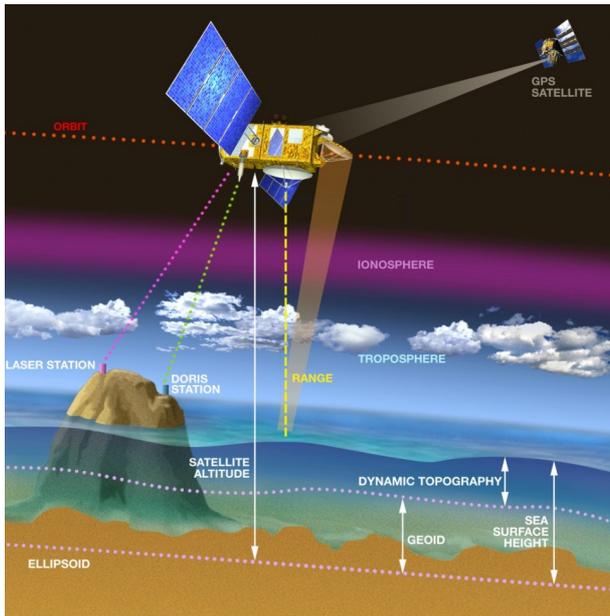


Céline Quentin, Atelier radar – Rennes – 17/10/2023

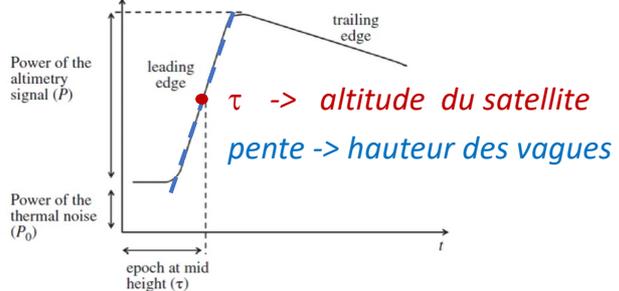
Diapositive n°22

# Mesures des vagues et des courants

Principe de l'altimétrie(©AVISO)

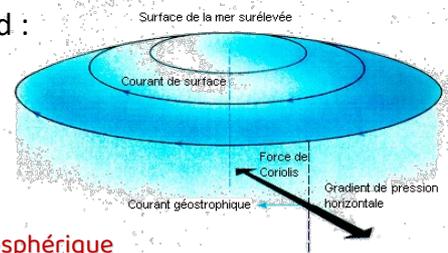


L'altimétrie spatiale est une technique d'observation de la Terre et de ses océans par satellite. Le principe est de mesurer précisément d'une part l'altitude du satellite, et d'autre part la distance entre le satellite et la surface. En faisant la différence, on obtient la « hauteur de mer ».



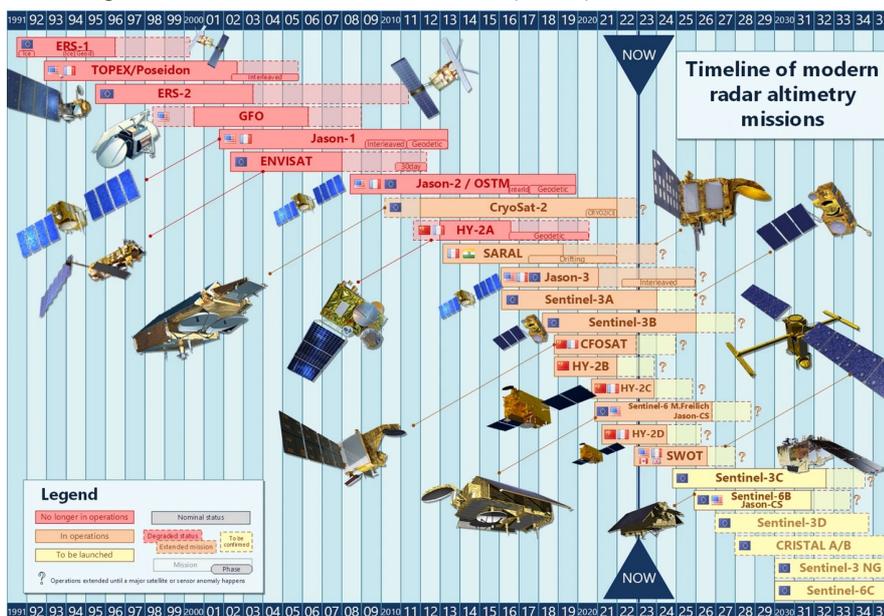
Hémisphère Nord :

dépression atmosphérique  
Anticyclone  
haute pression atmosphérique

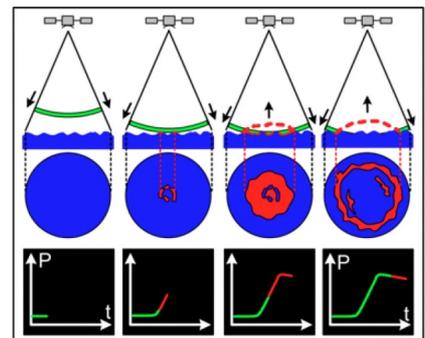


# La surface de l'océan depuis l'espace

Chronologie des missions d'altimétrie radar modernes(©CNES)



- ERS : nadir, bande C
- Topex-Poséidon, Jason : Ku et C
- Alti-Ka/SARAL: bande Ka
- CFOSat/SWIM: diffusiomètre (Ku)
- SWOT : interféromètre (Ka)
- Sentinel/SRAL : nadir (Ku)



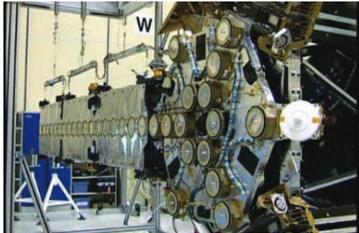
# Soil Moisture Ocean Salinity



La mission **SMOS** embarque l'instrument **MIRAS** Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis - un radiomètre micro-onde imageur en bande L dont le principe observationnel repose sur l'interférométrie et la synthèse d'ouverture.

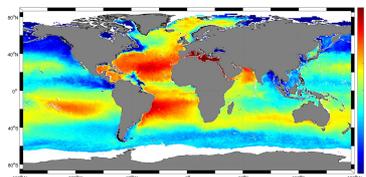
## Objectifs:

- Suivi des courants marins et de ses évolutions
- Impact climatique
- Meilleure connaissance du rôle des océans dans le cycle du [carbone](#)
- Suivi de l'[humidité](#) du sol combiné avec l'évolution du couvert [végétal](#)
- Amélioration de la connaissance du processus de [photosynthèse](#)

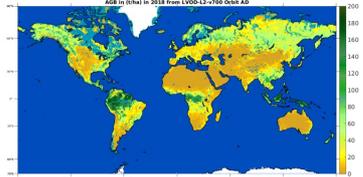


Le réseau d'antennes de l'instrument MIRAS est formé par trois bras espacés de 120°, avec 23 récepteurs équidistants appelés LICEF (Lightweight Cost-Effective Front-end).

Carte de salinité moyennée sur le mois de juillet 2015 générée à l'initiative de l'ESA sur le changement climatique



La profondeur optique de la végétation (VOD) peut être traitée afin d'obtenir une estimation globale de la biomasse aérienne (AGB)



## Quelques références de cours

- Michel Ney, Bases de l'électromagnétisme, Technologies de l'information, 2004
- Jonathan CHENAL, Propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre, Cycle des ingénieurs de première année, Institut national de l'information géographique et forestière, Ecole nationale des sciences géographiques (ENSG), Champs-sur-Marne. 2018
- Dominic Grenier, Antennes et propagation radio, cours du Département génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Québec, Canada. 2016
- Ahmed Zitouni - Cours d'antennes à l'Université Hassiba Benboualide Chlef, 2018
- Fayçal Boukerroum, Propagation d'ondes et Antennes, Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel. 2016
- Constantine Balanis, Antenna theory: Analysis and Design, Fourth edition, Wiley & sons, 2016