

Auteur: Professeur de l'enseignement maritime H.Baudu
herve.baudu@supmaritime.fr
 Version validée département Navigation:
 - 1.0 septembre 2015

ENSM
 ECOLE NATIONALE SUPERIEURE MARITIME



- Principe
- Milieux de propagation
- Différentes couches
- Différents types de propagation
- Propagation en fonction de l'onde

La propagation des ondes

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas des cours proposés, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni des conséquences liées à la mise en oeuvre des informations et schémas contenus dans ce cours. La diffusion de ce support est soumise à l'autorisation de l'auteur et ne doit, en aucun cas servir à des fins commerciales.

[page d'accueil](#)



www.traitedemanoeuv्रे.fr

 Traité de Manœuvre

Accueil

Ouvrages

App Colregs

Cours

Code Polaire

News

Contact

COURS DE NAVIGATION

Cours de navigation L1, L2 et L3

En version Pdf:

En cours de rédaction pour les versions .pdf

1. Cours de Navigation L1:
2. Cours Navigation L2:
3. Cours de Navigation L3:

En version Flash:

Vous pouvez télécharger les fichiers des cours de Navigation en Flash.swf sur votre PC et les lire avec le plugin Flash player ou Internet (uniquement sur PC). Pour cela, décompresser les fichiers ZIP à télécharger ci-dessous. Mettre tous les fichiers L1, L2 et L3 dans un même dossier pour bénéficier des liens à partir de la page « passerelle.swf » (vous pouvez également mettre les fichiers Colregs – voir menu « Cours Colregs »):

Cours sur Youtube: [Cours de navigation Hervé Baudu](#)

Ondes électromagnétiques - Propagation



Principe

La propagation des ondes électromagnétiques est un **phénomène complexe** qui dépend fortement de l'environnement. Elle répond aux éléments suivants:

- **phénomènes particuliers** de propagation souvent assimilés aux principes de "l'optique";
- **milieux de propagation** (sol, atmosphère, ionosphère)

Les propriétés de chaque gamme d'ondes électromagnétiques vont permettre, en fonction de leur comportement, de les **classer par type de propagation** (onde directe et indirecte, de sol, de ciel).

phénomènes particuliers

Les ondes électromagnétiques sont soumises aux 4 phénomènes suivants:

- Réflexion; - Diffraction;
- Réfraction; - Absorption.

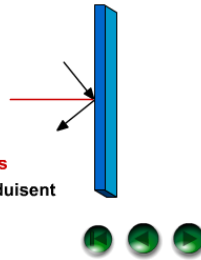
Réflexion

La réflexion, due à un obstacle, s'accompagne d'un **changement de phase de l'onde**.

L'intensité de l'onde réfléchie dépend des paramètres suivants:

- propriétés réfléchissantes intrinsèques de l'obstacle;
- angle d'incidence;
- fréquence f : plus elle sera grande plus la réflexion sera importante;
- type de polarisation.

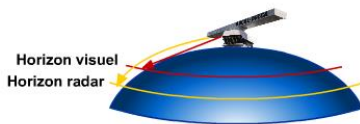
Les réflexions sont **négligeables en basses fréquences** mais **importantes en très hautes fréquences**, notamment avec le radar où tous les phénomènes météorologiques se traduisent par de faux échos sur le scope.



Ondes électromagnétiques - Propagation

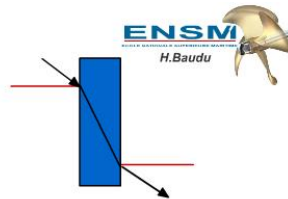
Réfraction

L'onde radio est réfractée lorsqu'elle passe d'une masse d'air à une autre aux caractéristiques différentes (température, pression, densité...):

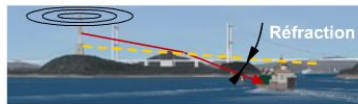


Horizon visuel
Horizon radar

- **verticalement**: l'horizon radio (UHF) et radar (SHF) est **plus éloigné de 15%** que l'horizon visuel.



- **horizontalement**: l'onde radio qui traverse la côte obliquement est **déviée horizontalement** car la terre et la mer ont des constantes diélectriques différentes.



Certains phénomènes optiques sont la conséquence de l'**indice de réfraction** à travers la densité de ces différentes couches de l'atmosphère.

- le diamètre apparent du soleil ou de la lune en augmentation par rapport à la normale dans les basses couches;
- les couleurs rougeâtres du soleil à son coucher;
- le fil du bouchon de pêcheur à la ligne dont la partie immergée semble incurvée;
- mirage

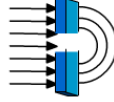


Ondes électromagnétiques - Propagation



Diffraction

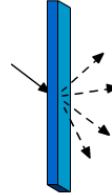
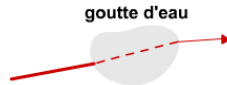
Les obstacles créent des **zones d'ombres** au-delà de cet obstacle, une partie de l'énergie de l'onde est déviée par diffraction. **Plus les fréquences sont basses, plus la diffraction est importante.** Elle est pratiquement **nulle en SHF** (radar).



Absorption

Amortissement des ondes électromagnétiques par le milieu de propagation dû à l'absorption de l'énergie. Elle **augmente avec la fréquence.**

- **Absorption atmosphérique:** faible en VLF, importante en SHF notamment face aux nuages, pluie. De façon générale, **l'atmosphère est un excellent propagateur.**



- **Absorption à la surface du sol:** une partie de l'énergie est réfractée et pénètre dans le sol. La **propagation sur mer est meilleure que sur la terre.**

- **Absorption ionosphérique:** atténuation de l'onde dans les couches ionisées de l'atmosphère. L'intensité dépend de la durée du trajet des ondes et de la densité des couches.



Ondes électromagnétiques - Les milieux de propagation



Conducteurs

Les corps électriquement **conducteurs** sont très **mauvais propagateur** des ondes électromagnétiques:

- atténuation de la vitesse de propagation;
- déviation de la direction de propagation;
- absorption de l'énergie.

Les corps **isolants** sont d'**excellents** milieux **propagateurs**; l'onde qui les traverse n'est pratiquement pas modifiée (guide d'onde radar).

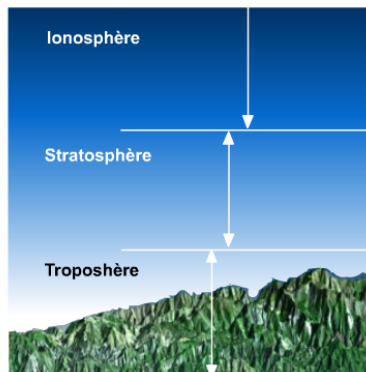
Atmosphère

L'atmosphère terrestre se décompose en plusieurs couches:

- Troposphère entre 0 et 20 km: développement des activités nuageuses;
- Stratosphère entre 20 et 50 km;

Ionosphère

- Ionosphère entre 50 et 300 km.



Ondes électromagnétiques

- Les milieux de propagation



Sol

Le sol peut être assimilé à un **milieu semi-conducteur** dont les caractéristiques dépendent de:

- la nature du terrain
- son taux d'humidité
- sa température; en basses fréquences, absorption importante dans les régions arctiques.

En **très basse fréquence**, **pénétration importante de l'onde dans le sol**, notamment avec les communications militaires spécifiques avec les sous-marins (quelques dizaines de mètres).



Ionosphère

Aux **hautes altitudes**, les gaz de l'atmosphère sont ionisés par les **UV du soleil** et les rayons cosmiques.

Les propriétés de l'ionosphère vont **varier avec**:

- l'heure de la journée
- les saisons
- l'activité solaire

Ce phénomène est plus important de jour et augmente avec l'altitude du fait de la rareté de l'air.

L'ionosphère ne constitue **pas un milieu homogène**. Elle est subdivisée en **3 différentes couches baptisées D, E et F**. Ces couches ont un rôle déterminant dans la propagation des ondes électromagnétiques. Les taux d'ionisation en altitudes sont connus par sondages atmosphériques réalisés soit à partir de lâchés de ballons, soit grâce à l'émission et à la réception de fréquences radioélectriques.



Ondes électromagnétiques

- Couches de l'ionosphère



3 couches

Couche D:

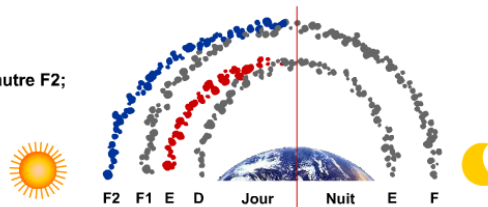
- Comprise entre 60 et 90km;
- **Forte variation d'altitude entre le jour et la nuit** pendant laquelle elle tend à se confondre avec la couche E;
- En réalité, n'existe que le jour, **réfléchit les ondes VLF et LF**.

Couche E:

- Comprise entre 100 et 110km; altitude très stable;
- Ionisation fortement variable selon l'éclairement solaire; **forte ionisation le jour**, légère persistance la nuit;
- **Réfléchit les ondes VLF, LF et MF**.

Couche F:

- Altitude moyenne 250km;
- Se **dédouble le jour** en une couche F1 et une autre F2;
- **Réfléchit les ondes LF, MF et HF**.



- Des perturbations difficiles à prévoir telles les éruptions solaires, orages magnétiques, aurores polaires viennent modifier ces couches.



Ondes électromagnétiques
- Couches de l'ionosphère



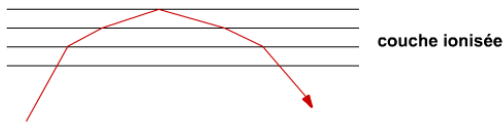
Fréquence critique

La rencontre d'une couche ionisée par une onde radio a pour conséquence:

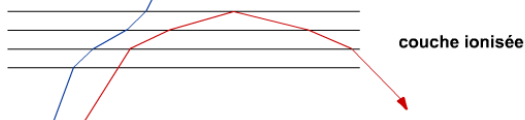
- une **absorption accrue** (surtout de jour dans la couche D);
 - un **changement de polarisation**;
 - une **courbure de la trajectoire** due au changement de l'**indice de réfraction** avec le degré d'ionisation.
- Les lois de l'optique sont applicables aux ondes hertziennes. Le sens de réfraction dépend de la valeur de la fréquence critique.

Pour une couche donnée, on définit F_c , fréquence critique telle que:

- tout signal de fréquence $F < F_c$ sera réfléchi vers le sol, quel que soit l'angle d'incidence;



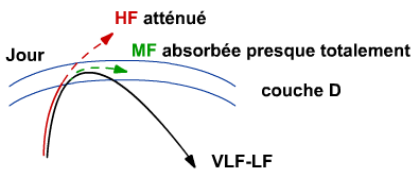
- Pour un signal de fréquence $F > F_c$, le trajet dépend de l'angle d'incidence.



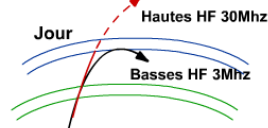
Ondes électromagnétiques
- Couches de l'ionosphère



Couche D - (inexistante la nuit)



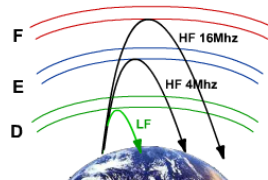
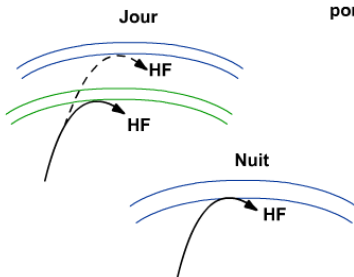
Couche E



Disparaît pratiquement la nuit
Ne laisse passer que les HF les plus élevées

Couche F

On constate que pour i fixé, plus les fréquences sont élevées, plus elles traversent les couches ionisées, ce qui se traduit par des portées plus importantes.

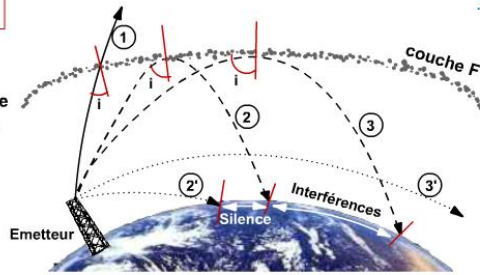


Ondes électromagnétiques - Couches de l'ionosphère



Angle d'incidence

Pour une couche donnée et $f > f_c$



- ① - i est trop faible, l'onde est déviée et se perd dans l'espace \Rightarrow ondes utilisées par les satellites
- ② et ③ - i est assez grand pour qu'il y ait réflexion vers le sol. Le retour sur terre se fait d'autant plus loin de l'émetteur que i est important: ce sont les ondes de ciel ou ionosphériques (sky wave)
- ②' et ③' - Pas de réflexion sur la couche ionisée; l'onde se propage en suivant la surface du sol: onde de sol ou de surface (ground wave)

Zones de silence et d'interférences

Zone de silence: La portée en onde de sol (2') est inférieure à la portée minimale en onde de ciel (2) \Rightarrow zone de silence où aucun récepteur ne peut recevoir le signal.

Zone d'interférences: portée onde de sol (3') est supérieure à la portée minimale en onde de ciel (2) et maximale (3) \Rightarrow zone où l'onde de ciel et l'onde de sol arrivent en même temps et se composent vectoriellement. Elles sont déphasées, et ce déphasage est variable.



Ondes électromagnétiques - Couches de l'ionosphère



Zones de silence et d'interférences

Les ondes ont suivi des chemins différents, l'onde de ciel a subi lors de la réflexion un changement de phase et de polarisation.

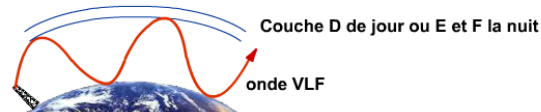
Les 2 ondes arrivent:

- en phase \Rightarrow signal fort,
- en opposition de phase \Rightarrow signal faible.

Le déphasage varie parfois rapidement d'où des variations rapides du signal entre ces deux extrêmes, ce qui s'appelle l'évanouissement ou **Fading**.

Portées

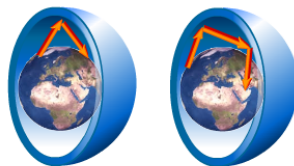
Les ondes de ciel peuvent se réfléchir plusieurs fois et parcourir ainsi de très longues distances - valable surtout pour les VLF



On obtient de très grandes portées mondiales en HF grâce aux ondes de ciel:

- de 2 à 6 Mhz: quelques milliers de km
- de 6 à 30Mhz: très vite absorbées

Il faut choisir la fréquence en fonction du lieu, de l'heure et de la saison \Rightarrow abaque de propagation par plage de fréquences.

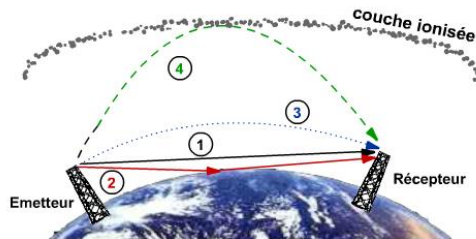


Ondes électromagnétiques

- Différents types de propagation



- ① Onde directe ou onde d'espace
- ② Onde indirecte réfléchié par le sol
- ③ Onde de surface ou onde de sol
- ④ Onde de ciel ou ionosphérique

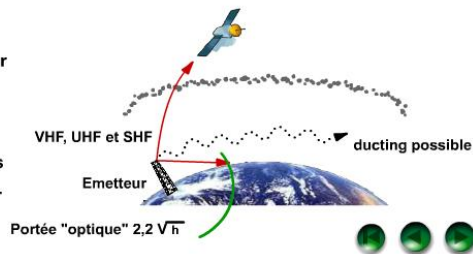


Ondes directes

Les émetteurs et récepteurs doivent être en visibilité directe **sans obstacles**.

Type de propagation des VHF, UHF et SHF

- Les obstacles de dimension supérieures à la longueur d'onde arrêtent l'onde => **zone d'ombre**
- Dans certaines conditions de pression, de température et d'humidité, on peut observer un phénomène de "**Duct**"; canalisation des ondes directes qui peuvent se traduire par des portées exceptionnelles.



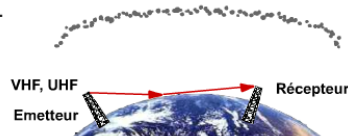
Ondes électromagnétiques

- Différents types de propagation



Ondes indirectes réfléchies par le sol

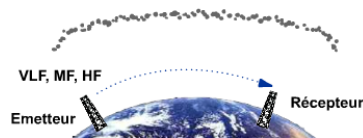
Ce type de réflexion ne se rencontre que dans le domaine des **ondes courtes et très courtes VHF, UHF** émises par des **postes très surélevés**.



Ondes de surface ou de sol

Ondes qui se propagent par diffraction autour de la surface terrestre. L'efficacité de la propagation **dépend de l'absorption des ondes** qui est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. La nature du sol et les alternances Terre / mer rencontrées sur le trajet conduisent à **d'importantes perturbations** de phase, d'amplitude de polarisation et de vitesse, notamment le long des côtes (**effet "littoral"**). Sur mer, elles sont plus faibles et la propagation plus régulière.

Portée: **VLF; plusieurs milliers de km**,
MF; quelques centaines de km,
HF; quelques dizaines de km,
 inexistantes en VHF



Ondes de ciel ou ionosphérique

Etudiées précédemment.



Ondes électromagnétiques - Propagation des ondes



Propagation des ondes suivant leur fréquence

Fréquence	Bande	λ Longueur d'onde	Type de propagation	Systèmes de navigation
3 KHz	VLF - Very Low Frequencies	100 km	- Onde de sol, propagation type guide d'onde entre la terre et les couches ionisées D et E. - Pénétration dans l'eau de mer (quelques mètres) - Portée mondiale si forte puissance	Communications militaires et sous-marines - Détection sismique - <i>Ex Oméga</i>
30 KHz	LF - Low Frequencies	10 km	- Onde de sol prépondérante - Onde ionosphérique importante de nuit mais inexistante de jour - Effet de Fading	- <i>Ex DECCA</i> - LORAN C (100 kHz) - Goniomètre et DGPS (285 à 315 kHz)
300 KHz		1 km	- Onde de sol prépondérante - Onde ionosphérique (un peu absorbée de jour par les couches D et E, réflexion sur les couches E et F de nuit) - Effet de Fading - Portées moyennes et précisions moyennes	Radiocommunications maritimes à moyenne distance
3 MHz	HF - High Frequencies	100 m	- Onde de sol (vite atténuée)- Onde ionosphérique très intéressante (portée mondiale possible)	Radiocommunications maritimes à longue distance
30 MHz		10 m	- Onde directe - Onde de sol très vite atténuée - Propagation importante par effet de Ducting	- Radiocommunications maritimes à courte distance - Télévision (174 à 216 Mhz)
300 MHz	VHF - Very High Frequencies	1 m	- Onde directe - Réflexion sur les obstacles - Directivité facilement atteinte	- DARPS (450 - 870 Mhz) - GPS (1,227 à 1,575 Ghz) - Téléphone portable (0,9 à 1,8 Ghz) - Radar (λ : 10 cm fq: 3 Ghz)
3 GHz	SHF - Super High Frequencies	10 cm	- Onde directe - Réflexion sur les obstacles - Directivité facilement atteinte	- Radar (λ : 3 cm fq: 9 Ghz) - Radiocommunications satellitaires (Inmarsat) - Télévision par satellite (12 Ghz)
30 GHz		EHF - Extremely High Frequencies	1 cm	- Onde directe - Réflexion sur les obstacles - Directivité facilement atteinte
300 GHz	1 mm		- Onde directe - Réflexion sur les obstacles - Directivité facilement atteinte	- Détecteur infra-rouge - Fan Beam

