

11 LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Un des canaux utilisés pour les communications VHF en aviation a une fréquence de 120 MHz. Quelle est la longueur d'onde de cette onde ?

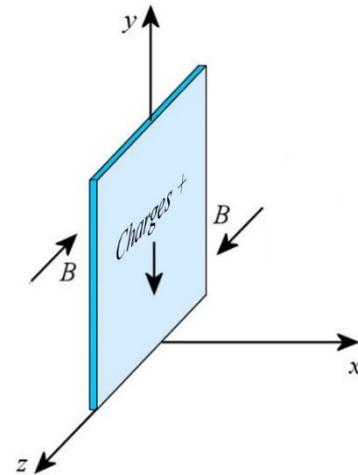


www.commsystems.asia/Aviation-communications.html

Apprenez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

11.1 QU'EST-CE QU'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE ?

Imaginons qu'on ait une immense plaque métallique et qu'on fasse passer un courant dans cette plaque. Comme les courants font un champ magnétique, il y aura un champ magnétique de chaque côté de la plaque. La figure de droite montre la direction de ce champ si le courant est vers le bas.



Avec une plaque très grande, le champ est uniforme, c'est-à-dire que le champ est de la même grandeur, peu importe à quelle distance on est de la plaque.

On peut maintenant se demander ce qui arriverait si on changeait le courant. En changeant le courant, on change la grandeur du champ magnétique. Est-ce que le champ à un endroit très loin de la plaque va changer instantanément quand on change le courant ou est-ce qu'il y aura un certain délai avant que la modification du champ se propage jusqu'à cet endroit ?

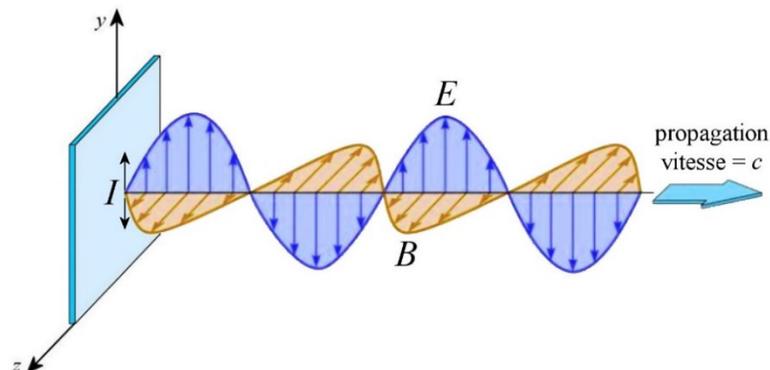
James Clerk Maxwell s'est penché sur la question au 19^e siècle et il est arrivé à une conclusion très intéressante : les modifications du champ se propagent à la vitesse de 299 792 458 m/s, c'est-à-dire à la vitesse de la lumière. Pour cette vitesse, on utilise le symbole c .

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Maxwell a également découvert que les variations de courant entraînent aussi la formation d'un champ électrique.

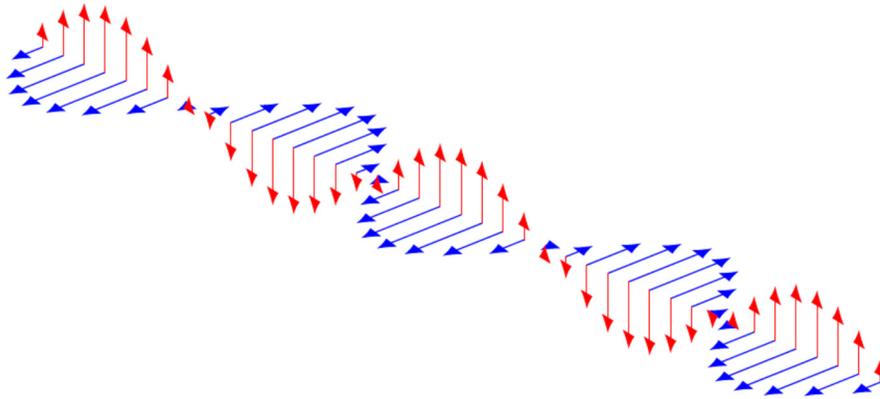
Tout cela signifie que si le courant dans notre plaque infinie changeait, alors les variations de champ magnétique et électrique faites par les charges de la plaque se propageraient à la vitesse de la lumière en s'éloignant de la plaque infinie. Par exemple, si le courant variait continuellement en passant alternativement d'un courant vers le haut à un courant vers le bas (de façon sinusoïdale), alors les champs varieraient constamment et les variations se propageraient à la vitesse de la lumière.



On a alors une onde électromagnétique, c'est-à-dire une onde faite de champ électrique et de champ magnétique, qui se propage à près de 300 000 km/s.

Maxwell, qui est arrivé en 1865 à la conclusion que les perturbations des champs électrique et magnétique se propagent à la vitesse de la lumière, fut sûrement très excité par ce résultat. Il venait de découvrir que la lumière est en fait une onde électromagnétique. Il venait d'élucider le mystère de la nature de la lumière. Hertz a été le premier, en 1887, à confirmer expérimentalement que de telles ondes électromagnétiques existent.

Si le courant dans la plaque varie de façon sinusoïdale, alors les champs vont aussi varier de façon sinusoïdale. Voici à quoi ressemble une onde électromagnétique sinusoïdale. Le champ électrique est en rouge et le champ magnétique est en bleu.



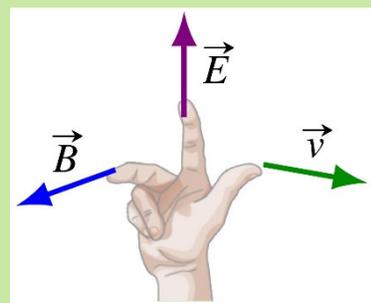
Voici une animation du mouvement de cette onde.

<http://www.youtube.com/watch?v=4CtnUETLIFs>

Il y a une règle de la main droite pour trouver la direction de propagation d'une onde électromagnétique.

Direction de propagation d'une onde électromagnétique

Quand on met nos doigts de la main droite dans la direction du champ électrique et qu'on les plie dans la direction du champ magnétique, notre pouce nous donne la direction de propagation de l'onde.



Les 2 ondes montrées précédemment se propagent donc vers la droite.

Dans une onde électromagnétique, il y a un lien entre les grandeurs des champs E et B . Ce lien est

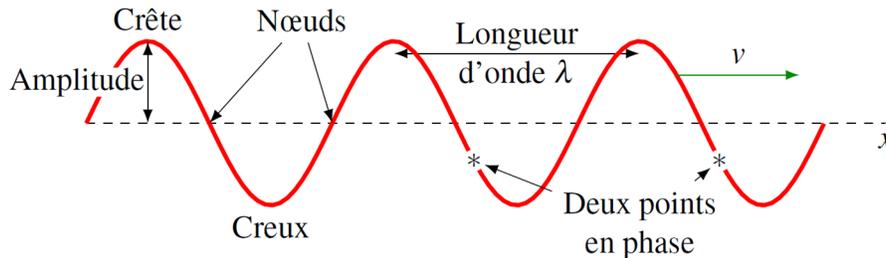
Lien entre E et B dans une onde électromagnétique

$$E = Bc$$

11.2 LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Un peu de vocabulaire

Pour une onde sinusoïdale, on a les éléments suivants.



L'**amplitude** (A) est la valeur maximum du champ (il y a une amplitude pour le champ électrique et une amplitude pour le champ magnétique).

Les **crêtes** sont les endroits où les champs atteignent leur valeur maximale positive (les deux champs atteignent leur valeur maximale positive au même endroit).

Les **creux** sont les endroits où les champs atteignent leur valeur maximale négative (les deux champs atteignent leur valeur maximale négative au même endroit).

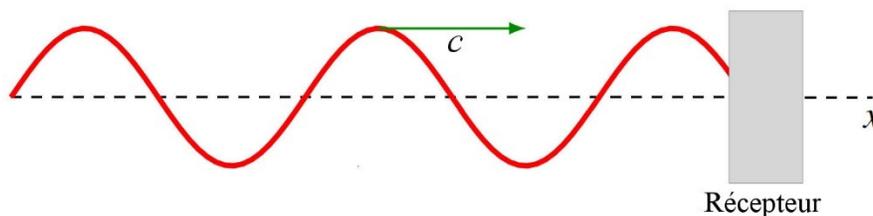
Les **nœuds** sont les endroits où les champs sont nuls.

Les points en phase sont des points qui sont à la même position sur un cycle du sinus. Il peut y avoir un ou plusieurs cycles entre ces points en phase. On remarque que toutes les crêtes sont en phase et que tous les creux sont en phase.

La **longueur d'onde** (λ) est la distance entre les crêtes. (De façon correcte, c'est la distance entre deux points en phase les plus près. C'est donc la longueur d'un cycle du sinus.)

L'onde se déplace à une certaine **vitesse** (v).

Examinons maintenant comment change le champ quand on capte l'onde avec un récepteur.



Quand l'onde va avancer, le champ reçu va alterner entre un champ positif (dirigé vers le haut) et un champ négatif (dirigé vers le bas). Au moment montré sur la figure, le champ est positif. Puisque l'onde avance, on voit que c'est une crête qui va bientôt arriver au

récepteur. Le champ est donc en train d'augmenter. Une fois la crête passée, c'est un creux qui va arriver. Quand le creux sera arrivé, le champ sera négatif. Puis une nouvelle crête va arriver et le champ redeviendra positif. Puis un nouveau creux va arriver et le champ redeviendra négatif, et ainsi de suite.

Avec une onde sinusoïdale, les champs alternent continuellement de signes. On peut alors définir les quantités suivantes.

La **période** de l'onde (T) est le temps que prendront les champs pour faire une oscillation complète.

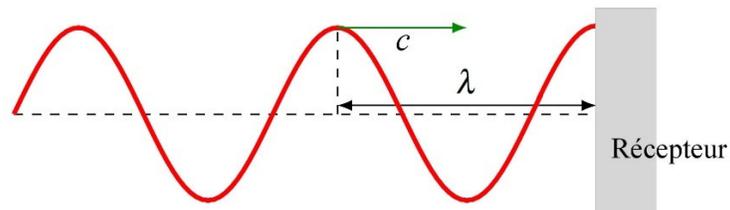
La **fréquence** de l'onde (f) est le nombre d'oscillations que feront les champs en une seconde.

La relation entre ces deux quantités trouvées précédemment dans le chapitre sur les courants alternatifs est toujours valide.

$$f = \frac{1}{T}$$

Lien entre la fréquence et la longueur d'onde

Pour trouver le lien entre la longueur d'onde et la fréquence, on va prendre la situation suivante.



À ce moment, le récepteur reçoit une crête. Avec l'onde qui avance, on va capter ensuite un creux pour revenir à une crête. En passant ainsi d'une crête à la crête suivante, le champ au récepteur aura fait un cycle complet. Cela veut dire que le temps pour faire une oscillation (période T) est égal au temps que ça va prendre pour que la crête suivante au récepteur. Comme cette crête est à une distance λ et qu'elle arrive avec une vitesse v , le temps qu'elle prend pour arriver est λ/c . On a donc

$$T = \frac{\lambda}{c}$$

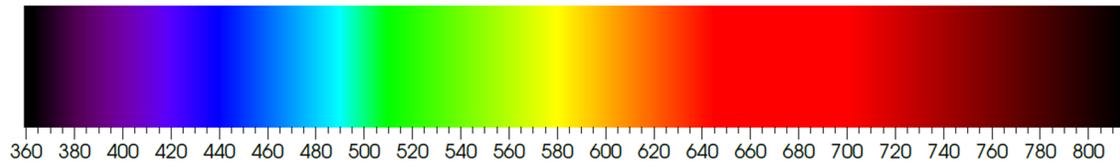
Ce qui nous donne

Lien entre λ et f ou lien entre λ et T

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

Le spectre électromagnétique

La longueur d'onde est reliée à la nature du rayonnement électromagnétique. Par exemple, si la longueur d'onde est de 450 nm, on a de la lumière bleue et si la longueur d'onde est de 650 nm nous avons de la lumière rouge. La figure suivante nous montre la couleur de la lumière en fonction de sa longueur d'onde en nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

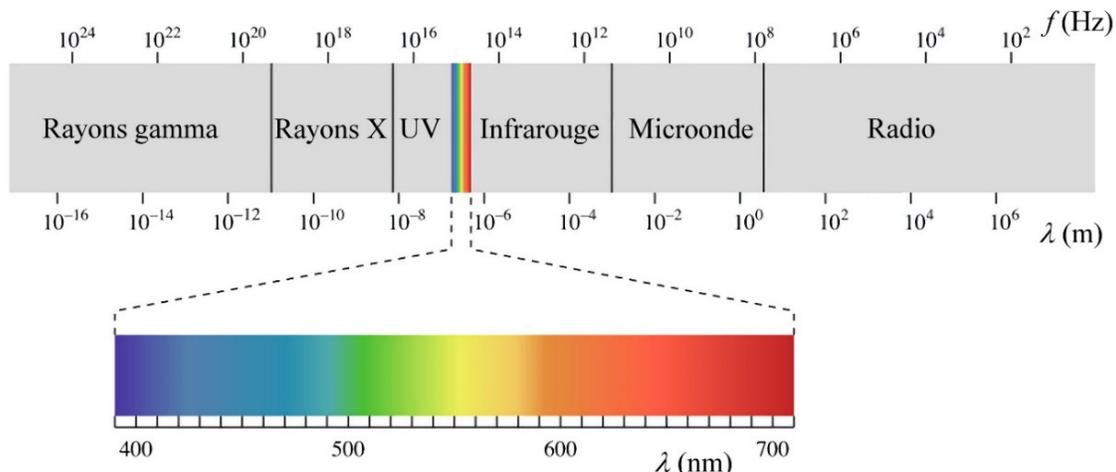


Cette représentation de la séparation de la nature de la lumière selon sa longueur d'onde s'appelle *le spectre électromagnétique*.

On peut superposer des ondes lumineuses. Quand on superpose une quantité égale de toutes les couleurs de la figure, on obtient de la lumière blanche.

Il n'y a pas de couleur associée pour des longueurs d'onde supérieures à 750 nm (approximativement) ou inférieures à 350 nm (approximativement) parce que notre œil ne capte pas ces ondes. L'œil humain capte seulement les ondes qui ont une longueur d'onde entre 400 nm et 700 nm (approximativement). C'est la *partie visible du spectre électromagnétique*.

En réalité, le spectre se prolonge de chaque côté du spectre visible et une bonne partie du spectre est composée de lumière que nos yeux ne peuvent pas percevoir. On a classé ces ondes en catégories selon leur longueur d'onde. La figure suivante vous montre ce classement.



fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum

Ce diagramme donne les valeurs de longueurs d'onde et de fréquence. On peut facilement passer d'une valeur à l'autre avec $c = \lambda f$.

Exemple 11.2.1

Un des canaux utilisés pour les communications VHF en aviation a une fréquence de 120 MHz. Quelle est la longueur d'onde de cette onde ?

On trouve la longueur d'onde avec $c = \lambda f$.

$$c = \lambda f$$

$$3 \times 10^8 \frac{m}{s} = \lambda \cdot 120 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{120 \times 10^6 \text{ Hz}}$$

$$\lambda = 2,5 \text{ m}$$

Examinons les différentes catégories d'onde électromagnétique.

Les ondes radio et les micro-ondes (Hertz 1888)

Ondes radio : λ de plus de 3 m
Micro-ondes : λ entre 1 mm et 3 m

Ces ondes sont utilisées pour les communications. Il existe une séparation très détaillée des longueurs d'onde selon l'utilité qu'un veut en faire : la télévision, la radio commerciale, cellulaire, la radionavigation aéronautique, la radionavigation maritime, la météorologie, les communications satellites, la radioastronomie, l'exploration spatiale et autres. Vous pouvez voir cette séparation pour le Canada sur ce site.

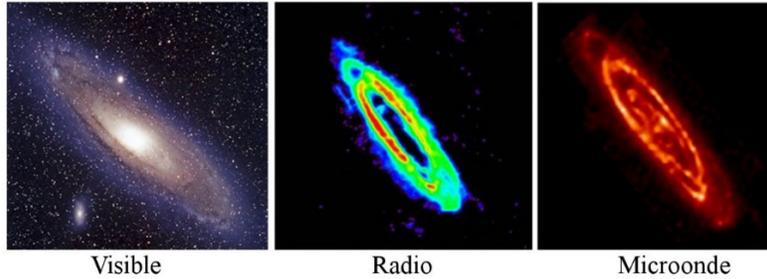
[http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/spectrallocation-08.pdf/\\$FILE/spectrallocation-08.pdf](http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/spectrallocation-08.pdf/$FILE/spectrallocation-08.pdf)

Cette séparation est nécessaire pour éviter que votre cellulaire capte des ondes servant à autre chose. Ça serait un peu tannant si, en parlant au cellulaire, on entendait constamment un poste de radio en même temps, ou des communications entre policiers.

Les fours à micro-ondes utilisent très souvent des micro-ondes ayant une fréquence de 2450 MHz, donc une longueur d'onde de 12,2 cm. Voici une démonstration d'utilisation dangereuse des fours micro-ondes.

https://www.youtube.com/watch?v=8j5_iaIrWeE

En radioastronomie, on étudie les ondes radio et micro-ondes émises par des objets célestes. On fait alors une image qui correspond à ce qu'on pourrait voir si nos yeux étaient sensibles à ces longueurs d'onde. Il y a des choses qu'on peut voir sur ces images qu'on ne pourrait pas voir avec la lumière visible. Par exemple, voici trois images de la galaxie d'Andromède. La première est en lumière visible, la deuxième en ondes radio et la dernière en micro-ondes ($\lambda = 24 \mu\text{m}$).



www.wired.com/wiredscience/2011/04/jill-tarter-qa/
thebeautifulstars.blogspot.ca/2011/08/multi-wavelength-views-of-stuff.html

Erreur fréquente : Prendre la vitesse du son pour la vitesse des ondes radio



Les ondes radio qui passent de l'antenne émettrice de la station à votre récepteur radio à la maison ou dans l'auto vont à la vitesse de la lumière. Vous ne pouvez pas les entendre sous cette forme. Elles deviendront uniquement du son quand votre récepteur aura transformé l'onde radio en onde sonore.

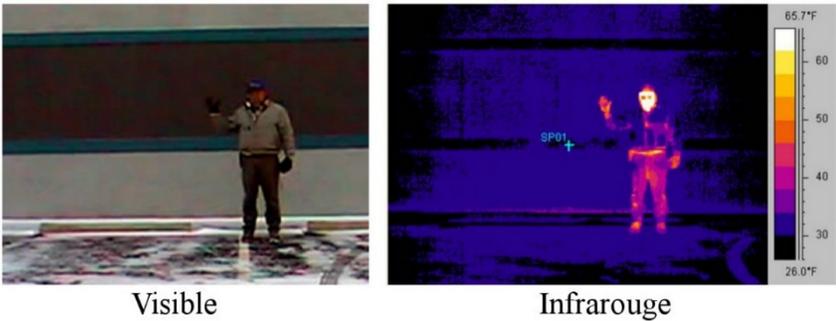
Les infrarouges (Herschell 1800)

Infrarouges : λ entre 700 nm et 1 mm

Les infrarouges sont absorbés par de nombreux types de molécules. L'énergie absorbée ira alors en vibration et en rotation des molécules, ce qui signifie que leur température augmente. C'est pour ça qu'on peut percevoir les infrarouges (du moins une partie de ceux-ci) par une sensation de chaleur.

On verra un peu plus loin que les objets émettent du rayonnement électromagnétique et que ce rayonnement change selon la température de l'objet. Pour des objets ayant des températures entre 3 K et 4000 K, donc la plupart des objets autour de nous, ce rayonnement est principalement composé d'infrarouges. Plus l'objet est chaud, plus le rayonnement par unité de surface est intense. Si on pouvait voir l'infrarouge, tous les objets autour de nous seraient des sources lumineuses. Selon l'intensité lumineuse, on pourrait connaître la température des objets.

Nos yeux ne sont peut-être pas sensibles aux infrarouges, mais certaines caméras le sont. On obtient donc des images qui montrent ce qu'on pourrait voir si on pouvait voir l'infrarouge.



www.solarcrete.com/solarcrete-insulated-concrete-wall-buildings.php

On voit que la source la plus importante d'infrarouge est le visage du bonhomme, l'élément le plus chaud de cette image.

Les caméras numériques ordinaires sont sensibles à une partie de l'infrarouge. On peut faire une image en infrarouge en utilisant un filtre qui bloque le visible et laisse passer l'infrarouge. On obtient alors une image qui ressemble à la photo de droite. Cette image est une image en infrarouge proche (700 à 900 nm). Elle a été prise en été, même si tout semble gelé.



Il y en a beaucoup d'autres sur ce site.

<https://www.smashingmagazine.com/2009/01/40-incredible-near-infrared-photos/>

C'est essentiellement une photo en noir et blanc qui mesure l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les objets. À ces longueurs d'onde, les infrarouges ne proviennent pas de la chaleur des objets, mais plutôt de la réflexion de la lumière du Soleil sur les objets, comme c'est le cas en visible.

Attention, car certaines caméras vidéos captent l'infrarouge. Elles captent donc le rayonnement émis par les objets chauds. Dans le film ici, on voit apparaître une source d'infrarouge derrière la personne. Ce gaz chaud, provenant de l'anus de la personne (oui oui, un pet), se démarque bien de l'air ambiant, car il émet beaucoup plus de rayonnement infrarouge que l'air ambiant plus froid.

<https://www.youtube.com/watch?v=NccsJ4MxCW0>

Certains matériaux peuvent être opaques en visible, mais transparents pour d'autres longueurs d'onde (ou inversement). C'est le cas ici avec cette image montrant que les sacs d'ordures noirs sont opaques en visible, mais transparents en infrarouge. Remarquez cependant que les lunettes étaient transparentes en visible, mais qu'elles sont opaques en infrarouges.

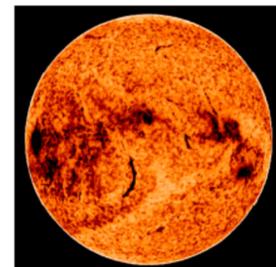


Visible

Infrarouge

coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_kids/learn_ir/

On peut également faire de l'astronomie en infrarouge. Voici une image du Soleil en infrarouge ($\lambda = 1083 \mu\text{m}$). Il a une allure bien différente qu'en visible.

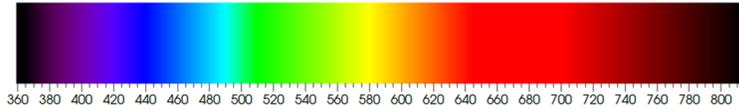


solar.physics.montana.edu/ypop/Spotlight/Today/infrared.html

Le visibleVisible : λ entre 400 nm et 700 nm

(En fait, on peut aller de 380 nm à 750 nm.)

Pour le visible, chaque longueur d'onde correspond à une couleur précise. On a déjà vu l'image montrant les couleurs en fonction de la longueur d'onde. Le tableau suivant donne un lien entre les couleurs et les longueurs d'onde. Évidemment, les limites entre les couleurs sont un peu approximatives.



Couleur	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Longueur d'onde
Rouge	700 à 625	Vert bleuté	530 à 492
Orange	625 à 590	Cyan	492 à 487
Jaune	590 à 580	Bleu verdâtre	487 à 482
Jaune verdâtre	580 à 575	Bleu	482 à 465
Vert jaunâtre	575 à 560	Indigo	465 à 435
Vert	560 à 530	Violet	435 à 400

L'ultraviolet (Ritter 1801)Ultraviolet : λ entre 10 nm et 400 nm

(Pour les longueurs d'onde inférieures au visible, les limites entre les catégories sont plus floues. Vous verrez que certaines longueurs d'onde sont dans deux catégories.)

Tout comme les infrarouges et le visible, les ultraviolets sont absorbés par de nombreuses molécules. La mélanine dans la peau absorbe les ultraviolets provenant du Soleil, ce qui donne un beau bronzage. Les molécules de vos vêtements blancs absorbent les ultraviolets des « *blacklights* » dans les bars et les réémettent en visible. Ils semblent alors beaucoup plus lumineux qu'ils devraient l'être selon l'éclairage ambiant.

Encore une fois, on peut faire de la photographie ultraviolette. Il suffit d'avoir une caméra sensible à ces longueurs d'onde (ou une partie de ces longueurs d'onde). Voici un exemple d'image obtenu ainsi. On voit alors apparaître des éléments qui étaient invisibles en visible.



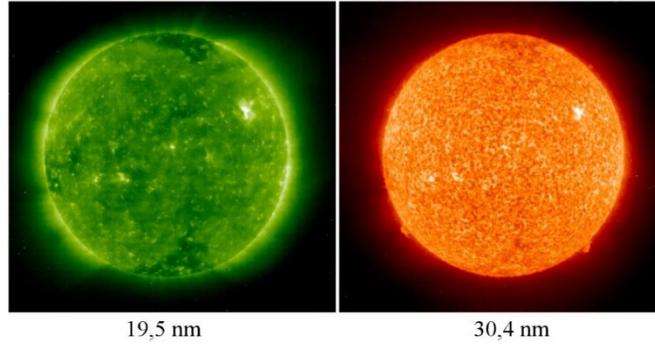
Visible

Ultraviolet

loveplantlife.blogspot.ca/2012/08/a-bees-eye-view-of-flowers.html

Comme toujours, on peut faire de l'astronomie en étudiant le rayonnement ultraviolet. Voici deux images du Soleil en ultraviolet.

www.thesuntoday.org/the-sun-now/



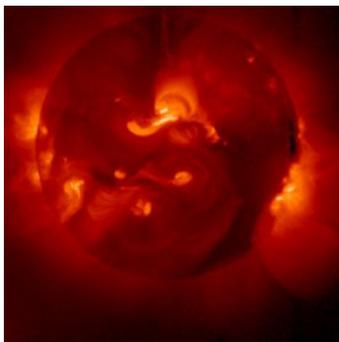
Les rayons X (Röntgen 1895)

Rayons X : λ entre 0,001 nm et 100 nm

À ces longueurs d'onde, les ondes électromagnétiques ont un pouvoir de pénétration assez important. Ils peuvent donc traverser plusieurs substances avec un degré d'absorption variable selon le matériel. C'est ce qui permet d'obtenir des images comme celle-ci.



lupusadventurebetweenthelines.wordpress.com/2011/03/20/lupus-arthritis-on-a-cloudy-day/



Le Soleil a une allure très différente en rayons X (longueur d'onde entre 0,3 et 4,5 nm pour cette image).

www.thesuntoday.org

La galaxie d'Andromède a aussi une allure bien différente en rayons X.



Visible



Rayons X

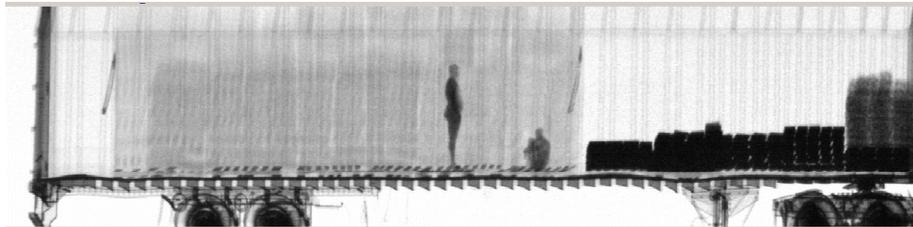
chandra.harvard.edu/photo/2007/m31/

Les rayons gamma (Villard 1900)

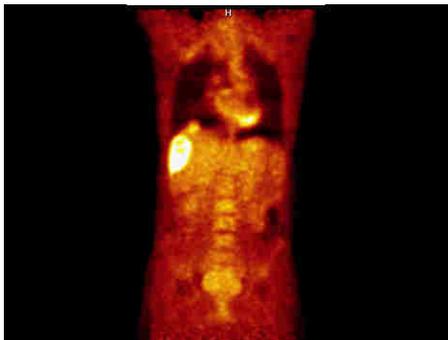
Rayons gamma : λ inférieure à 0,01 nm

Il y a un chevauchement assez important entre les rayons X et les rayons gamma. Traditionnellement, les rayons X sont les ondes de petites longueurs d'onde obtenues lors de transitions atomiques dans les atomes alors que les rayons gamma sont le résultat de désintégrations radioactives. C'est davantage l'origine du rayonnement que la longueur d'onde qui détermine le type d'onde.

À ces longueurs d'onde, les ondes électromagnétiques ont un pouvoir de pénétration encore plus grand. On peut donc en faire une utilisation un peu similaire à ce qu'on faisait avec les rayons X. L'image suivante a été obtenue grâce à des rayons gamma. On a pu ainsi détecter que deux personnes se cachaient dans ce camion.



teachnuclear.ca/contents/cna_radiation/gamma_rays/



www.nucmedinfo.com/Pages/petbase.html

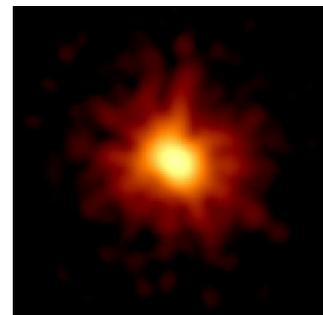
On utilise aussi les rayons gamma en imagerie médicale. L'image de gauche a été obtenue à l'aide de rayons gamma.

La Terre est constamment bombardée de rayons gamma, qui font alors partie des rayons cosmiques. On a observé dans ces rayons cosmiques des ondes ayant une longueur d'onde aussi petite que 10^{-20} m.

Il existe aussi des *sursauts de rayons gamma*. Ce sont des explosions gigantesques, en fait les plus importantes de l'univers, dont la cause n'est pas certaine pour l'instant. Elle libère jusqu'à environ 10^{44} J, soit environ toute l'énergie que va libérer le Soleil durant sa vie (10 milliards d'années). On reçoit alors des rayons gamma durant quelques dizaines de secondes.

L'image de droite montre un sursaut de rayons gamma visible à l'œil nu durant quelques secondes le 19 mars 2008. L'objet à l'origine de ce sursaut est situé à 10,6 milliards d'années-lumière de la Terre, ce qui veut dire qu'il faudrait 10,6 milliards d'années pour se rendre à cet objet en voyageant à la vitesse de la lumière (si l'univers ne prenait pas d'expansion).

en.wikipedia.org/wiki/GRB_080319B



Note sur les lasers

Les lasers émettent simplement des ondes électromagnétiques qui ne sont pas de nature différente par rapport aux autres ondes électromagnétiques. La seule différence qui nous intéresse ici est le fait que la lumière d'un laser est monochromatique. L'onde émise par les lasers est une onde électromagnétique ayant une valeur très précise de la longueur d'onde. Par exemple, les lasers hélium néon émettent une onde ayant une longueur d'onde de 632,8 nm, qui correspond à du rouge. Comme il n'y a qu'une seule couleur, on dit que la lumière est monochromatique. Il est vraiment rare que de la lumière naturelle soit monochromatique. Par exemple, la lumière provenant d'un objet rouge est souvent une superposition de plusieurs ondes sinusoïdales ayant des longueurs d'onde se situant autour de 650 nm plutôt que formée d'une seule onde ayant une longueur d'onde très précise. (En fait, même la lumière des lasers s'étend sur une plage de valeur de longueur d'onde, mais cette plage est très petite.)

Autrement, la lumière d'un laser n'est pas très différente de la lumière ordinaire. Certaines prouesses des lasers pourraient très bien se faire avec de la lumière ordinaire. Par exemple, on utilise des lasers pour couper des plaques de métal, mais on les utilise simplement parce qu'on a réussi à fabriquer des lasers qui émettent une lumière très intense. On pourrait tout aussi bien faire le découpage dans une plaque de métal avec de la lumière ordinaire, il suffirait d'en concentrer suffisamment sur l'endroit où on veut faire la coupe. La lumière des lasers n'a pas de propriétés coupantes ou explosives que la lumière ordinaire n'a pas.

Notez que la lumière générée par les lasers n'est pas nécessairement de la lumière visible. On peut, par exemple, avoir des lasers en micro-ondes (dans ce cas, le laser s'appelle plutôt un maser) ou en infrarouge (comme les lasers dans les lecteurs de CD, qui émettent une lumière ayant une longueur d'onde de 780 nm).

11.3 LES FRÉQUENCES UTILISÉES EN AVIATION

Plusieurs longueurs d'onde du spectre radio et microonde sont utilisées en aviation. Ces parties du spectre sont divisées en sous-catégories.

	Nom	Symbole	Fréquence	Longueur d'onde
Radio	Extremely Low Frequency	ELF	3 Hz – 30 Hz	10 000 km – 100 000 km
	Super Low Frequency	SLF	30 Hz – 300 Hz	1000 km – 10 000 km
	Ultra Low Frequency	ULF	300 Hz – 3 kHz	100 km – 1000 km
	Very Low Frequency	VLF	3 kHz – 30 kHz	10 km – 100 km
	Low Frequency	LF ou LW	30 kHz – 300 kHz	1 km – 10 km
	Medium Frequency	MF ou MW	300 kHz – 3 MHz	100 m – 1 km
	High Frequency	HF ou SW	3 MHz – 30 MHz	10 m – 100 m
	Very High Frequency	VHF	30 MHz – 300 MHz	1 m – 10 m
	Ultra High Frequency	UHF	300 MHz – 3 GHz	10 cm – 1 m
MO	Super High Frequency	SHF	3 GHz – 30 GHz	1 cm – 10 cm
	Extremely High Frequency	EHF	30 GHz – 300 GHz	0,1 cm – 1 cm

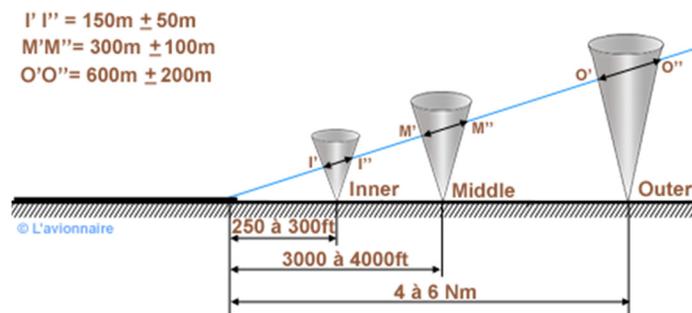
Le tableau suivant montre les fréquences utilisées en aviation pour les systèmes de communication et de navigation.

Bande	Fréquence	Fonction
LF	100 kHz	Loran C
	200 – 1700 kHz	ADF / NDB
MF	2,85 – 3,155 kHz	Communication MF
HF	3,4 – 23,35 MHz	Communications HF
VHF	75 MHz	Radiobornes Marker
	108,0 – 111,975 MHz	ILS
	111,975 – 117,975 MHz	VOR
	117,975 – 137 MHz	Communication VHF
UHF	235 – 399,95 MHz	Communication UHF
	962 – 1213 MHz	DME
	1030 et 1090 MHz	Transpondeur
	2,2 – 2,4 GHz	Altimètre radar
	5,5 GHz	Radar Météo (bande C)
	8,8 GHz	Radar Doppler (bande X)
	9,4 GHz	Radar Météo (bande X)
13,3 GHz	Radar Doppler (Bande K)	

Le **LORAN** (*LOng RANGE Navigation*) est un système de radionavigation utilisant les ondes d'émetteurs terrestres fixes pour établir une position. Le loran C n'est plus utilisé en Amérique depuis 2010 et en Europe depuis 2016. Il reste cependant quelques émetteurs actifs en Asie. Une version plus performante est en projet (E-LORAN) comme système de remplacement en cas de problème avec le système GPS, mais il n'est pas certain qu'il sera déployé.

L'**ADF** (*Automatic Direction Finder*), appelé également Radiocompas en français, désigne le récepteur à bord de l'aéronef, alors que le terme **NDB** pour *Non Directional Beacon* désigne la station émettrice au sol. L'ADF mesure l'angle (gisement) entre la direction de l'avion et la direction de la station NDB.

Les **radiobornes Marker** sont des radiobalises permettant au pilote de déterminer à quelle distance du début de la piste se trouve l'avion. Les 2 ou 3 radiobornes *Marker* d'une piste d'atterrissage envoient un faisceau étroit en direction verticale.



www.lavionnaire.fr/RadioNavMarkers.php

Quand un avion vole au-dessus d'une radioborne *Marker*, le signal de la radioborne active l'instrument d'indicateur de radioborne *Marker* de l'avion, puis l'alarme de couleur clignote sur le tableau de bord (bleu pour *outer*, ambre pour *middle* et blanc pour *inner*) avec une alarme sonore spécifique. En ce moment, la tendance est de remplacer ce système par un DME.

L'**ILS** (*Instrument Landing System*) est un système d'aide à l'atterrissage aux instruments utilisé dans plusieurs aéroports du monde. Il y a un guidage latéral (dans l'axe de la piste) et vertical (sur le plan de descente de la procédure). Il permet aux avions de se poser en toute sécurité et par tous les temps. Notez que les radiobornes *Marker* sont une des composantes de l'ILS.

Le **VOR** (*VHF omnidirectional range*) ou **radiophare omnidirectionnel VHF** est un système de positionnement fonctionnant avec les fréquences VHF (ou UHF pour les militaires).

Le **DME** (*distance measuring equipment*) est un système de balise qui permet de mesurer des distances. L'avion émet un signal capté par une balise. Cette dernière renvoie un signal avec un retard fixe et précis (50 ou 56 μ s selon le canal). En mesurant le temps entre l'émission et la réception, l'équipement de l'avion peut déterminer la distance de la balise.

Pour le **transpondeur**, le radar secondaire du contrôle aérien émet un signal à 1030 MHz. Quand le transpondeur de l'avion reçoit ce signal, il envoie sa réponse codée à la fréquence de 1090 MHz. La réponse décodée apparaît sur l'écran du radar.

Les ondes **MF** sont utilisées pour les communications régionales sur des distances inférieures à 600 km entre les stations. Les fréquences de 2850 kHz à 3022 kHz sont utilisées pour le contrôle aérien pour les avions circulant au-dessus des déserts, des mers et des océans. Les fréquences entre 3026 kHz et 3155 kHz servent au service mobile aéronautique régional et aux compagnies aériennes (43 canaux séparés de 3 kHz).

Les ondes **HF** sont utilisées pour communiquer avec les avions moyens et longs courriers. La météo VOLMET est aussi transmise sur ces fréquences.

Les ondes **VHF** sont utilisées pour les communications à courte et moyenne distance. La bande de communication **VHF** s'étend de 117,975 MHz à 137 MHz, avec des canaux espacés de 8,33 kHz (depuis 2018). Il y a un canal d'urgence très important à 121,5 MHz (on peut même acheter une montre qui va émettre sur cette fréquence en cas de pépins).

Les ondes **UHF** sont utilisées pour les communications militaires et pour le contrôle d'espace aérien supérieur (au-dessus de 19 500 pieds).

11.4 LA PROPAGATION DES ONDES EM

Les ondes électromagnétiques se propagent de façon différente selon leur fréquence.

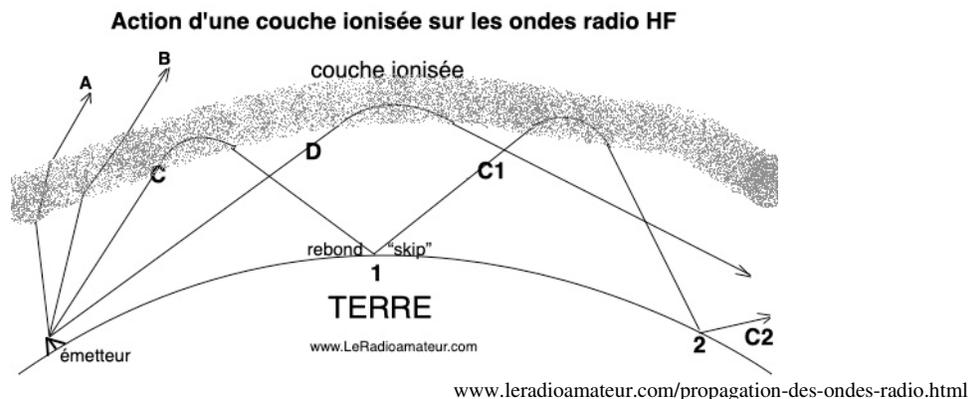
La propagation de surface (ground waves)

La conductivité de la surface terrestre fait en sorte que les ondes électromagnétiques de basse fréquence (LF, MF) suivent la surface de la Terre sur de longues distances. Pour permettre ce phénomène, ces ondes doivent être polarisées verticalement (voir la section 0 ci-dessous). Les surfaces plus conductrices, telles que l'eau salée des océans, favorisent la propagation de surface. Ces fréquences sont donc utilisées dans les systèmes de communication à très longue portée lors des traversées océaniques.

La propagation ionosphérique (sky waves)

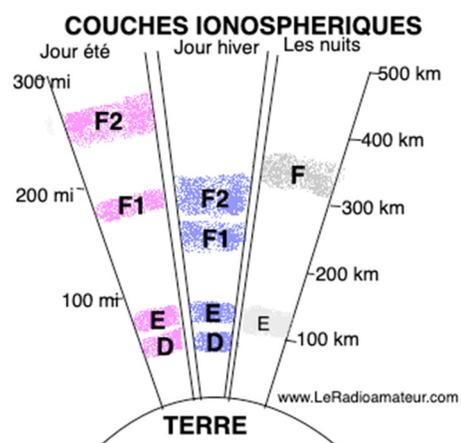
L'ionosphère est une région de la haute atmosphère (entre 60 km et 800 km) ou l'air est ionisé par les rayons cosmiques et les photons solaires. Cette ionisation fait en sorte que les ondes électromagnétiques HF qui entrent dans l'ionosphère peuvent, dans certaines conditions, être réfléchies vers le sol. On pourra émettre des signaux de manière presque verticale pour couvrir une étendue locale, ou les transmettre de façon oblique pour les faire réfléchir à longue distance.

Une fois réfléchies, les ondes peuvent rebondir sur la surface de la Terre pour retourner de nouveau vers l'ionosphère. On peut de cette manière transmettre des signaux partout à travers le monde.



L'ionosphère change beaucoup pendant la journée et l'année. La figure de droite montre les différentes couches présentes dans l'ionosphère selon le moment.

La couche D absorbe fortement les ondes ayant des longueurs d'onde entre 30 m et 160 m. Les ondes ayant une longueur d'onde inférieure à 30 m ($f > 10$ MHz) passent toutefois à travers cette couche. La couche D disparaît dès que la nuit tombe. Les fréquences absorbées par la couche D durant le jour peuvent maintenant atteindre la couche F.



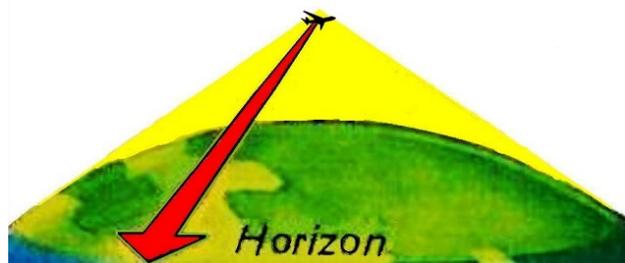
La couche E peut réfléchir les ondes entre 5 et 20 MHz. Toutefois, la plupart des ondes ne peuvent pas atteindre cette couche pendant le jour parce qu'elles sont absorbées par la couche D. Certaines ondes ayant des fréquences près de 10 MHz peuvent l'atteindre, mais seulement si elles sont émises presque à la verticale. Si elles arrivent jusqu'à la couche E, elles peuvent se propager jusqu'à des distances de 1200 km. La couche E se dissipe presque complètement la nuit. L'aube et le crépuscule sont les moments idéals pour profiter de cette couche. Parfois, il se forme des genres de régions plus ionisées qu'à l'habitude dans cette couche (on l'appelle alors la couche E sporadique). Quand cela arrive, la propagation des ondes ayant des fréquences supérieures à 28 MHz (les VHF) devient meilleure.

La couche F1 peut favoriser la propagation des ondes aux environs de 12 MHz le jour en été. À d'autres moments, cette couche a peu d'effet sur la propagation des ondes.

La couche F2 est la couche la plus importante pour la propagation des ondes HF. Elle se forme le jour, mais ne disparaît pas complètement durant la nuit (bien qu'il arrive à l'occasion qu'elle disparaisse complètement, parfois même pendant quelques jours, quand le Soleil est à son minimum d'activité, ce qui se produit tous les 11 ans). Cette couche peut réfléchir les ondes ayant des longueurs d'onde entre 7 et 30 MHz et permettre à ces ondes d'atteindre des points à la surface de la Terre à 4000 km de la source émettrice. Avec le rebond que ces ondes font à la surface de la Terre, le signal émis peut même faire le tour de la Terre et revenir à son point de départ !

La propagation spatiale (space waves)

Les fréquences d'ondes électromagnétiques supérieures à 30 MHz (VHF et plus) ne peuvent pas être conduites en surface (propagation de surface) de façon significative et ne peuvent pas être réfléchies par l'atmosphère (la plupart du temps). Le seul moyen de propagation efficace de ces fréquences est alors la ligne directe, qu'on appelle la propagation spatiale. C'est pourquoi un avion opérant à 10 000 pieds entendra beaucoup plus de communications sur la fréquence de route (126,7 MHz) qu'un second opérant à 3 000 pieds juste en dessous du premier (puisque plus de sources peuvent atteindre l'avion en ligne directe quand il est à une altitude plus élevée, comme on peut voir sur l'image.).



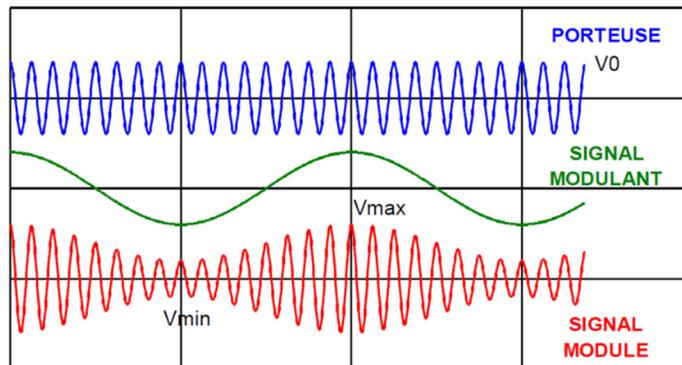
11.5 PRINCIPE DE BASE DE LA RADIO

On peut utiliser les ondes électromagnétiques pour transmettre de l'information d'un emplacement à un autre.

Les modulations d'amplitude et de fréquence

Il faut premièrement transformer le signal (qui peut être la voix de la personne qui communique par exemple) en onde radio. Dans le cas d'une voix transmise, l'onde radio doit être complètement différente de l'onde sonore puisque les fréquences des ondes sont complètement différentes (les fréquences sonores sont entre 10 Hz et 10 000 Hz, alors que la fréquence de l'onde radio est de plusieurs MHz).

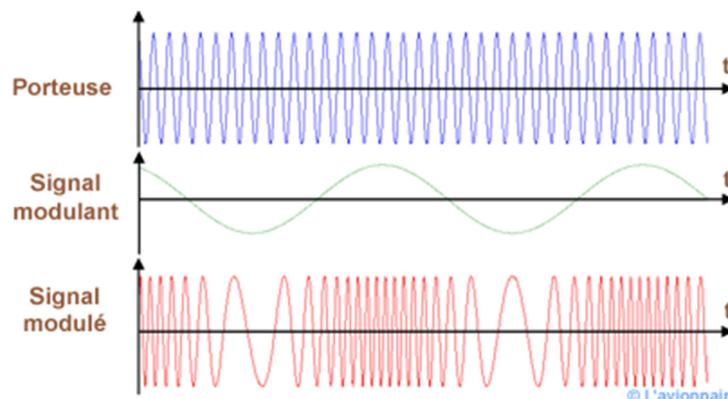
On peut intégrer l'onde sonore à l'onde radio avec la modulation d'amplitude, ce qui veut dire qu'on modifie l'amplitude de l'onde radio avec l'onde sonore. On augmente l'amplitude de l'onde radio quand la pression de l'onde sonore est plus grande et on diminue l'amplitude de l'onde radio quand la pression de l'onde sonore est plus petite (le son est une onde de pression, ce qui signifie que ce sont des variations de pression atmosphérique qui se propage à la vitesse du son).



riberie.regit.org/modulation.pdf

Cette façon de faire s'appelle la modulation d'amplitude. C'est ce qu'on utilise pour la radio AM, qui s'appelle AM, pour *amplitude modulation*.

On peut aussi intégrer le signal sonore à l'onde en variant la fréquence



www.lavionnaire.fr/RadioNavRadAlti.php

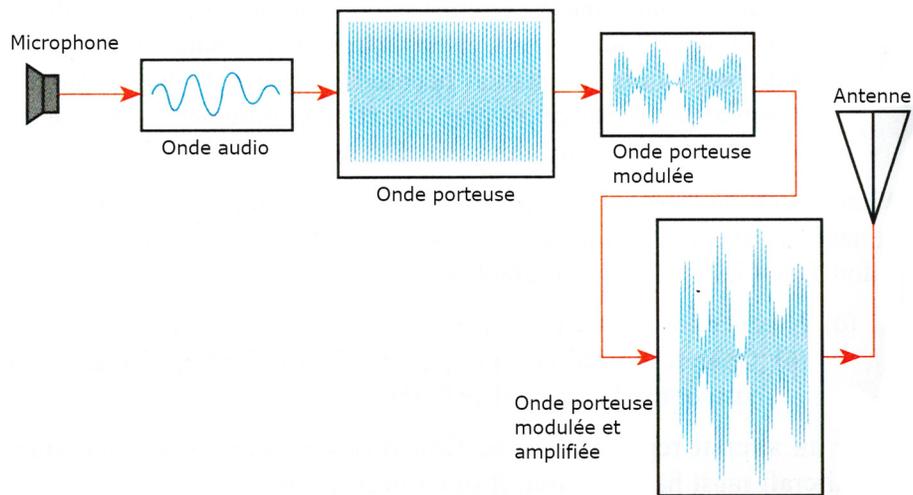
On augmente la fréquence de l'onde radio quand la pression de l'onde sonore est plus grande et on diminue la fréquence de l'onde radio quand la pression de l'onde sonore est plus petite.

Cette façon de faire s'appelle la modulation de fréquence. C'est ce qu'on utilise pour la radio FM, qui s'appelle FM, pour *frequency modulation*.

Les interférences d'origine humaine, telles que celles causées par les moteurs électriques et les systèmes d'allumage, et les interférences naturelles, telles que celles causées par la foudre dans l'atmosphère, modulent en amplitude tous les signaux radio à proximité. La modulation de fréquence est utilisée pour obtenir une communication sans interférence. L'amplitude d'une porteuse FM est maintenue constante par des circuits limiteurs, et toute interférence, qui module l'amplitude de la porteuse, est coupée afin qu'elle n'apparaisse pas dans la sortie. C'est ce qui est utilisé pour les communications VHF.

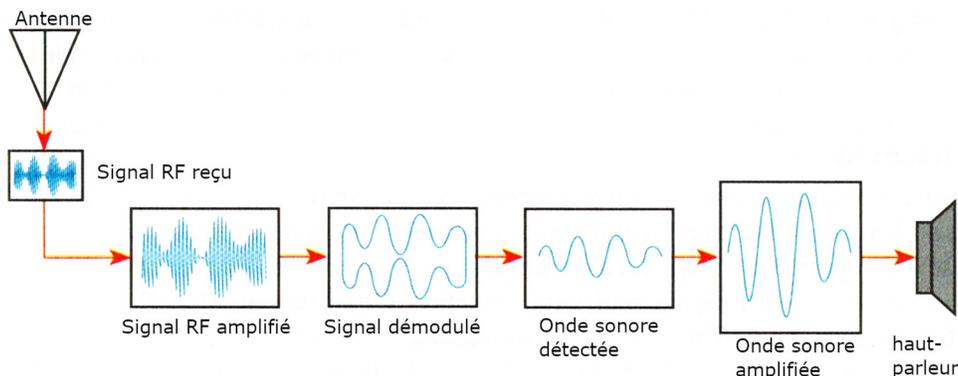
L'émission et la réception

La figure suivante montre un transmetteur à modulation d'amplitude (AM) simple.



En premier lieu, la voix du pilote est captée par le microphone. On module ensuite l'onde porteuse qui oscille à très haute fréquence (en VHF, soit entre 30 MHz et 300 MHz) avec l'onde sonore. L'onde ainsi produite est ensuite amplifiée pour que l'onde électromagnétique produite par l'antenne ait assez de puissance pour être émise dans l'espace et détectée par les récepteurs.

La figure suivante montre le récepteur qui sera nécessaire pour capter l'onde électromagnétique et la transformer en onde sonore.



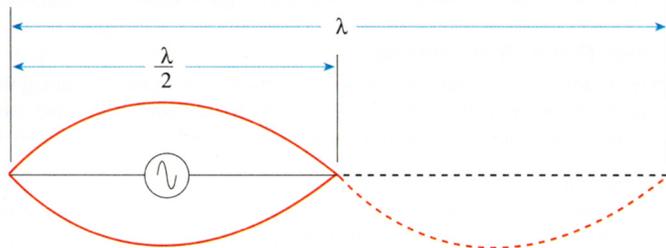
Puisque l'intensité de l'onde émise diminue avec la distance parcourue, l'onde reçue par l'antenne (signal RF) du récepteur doit être amplifiée. Le démodulateur utilise ensuite l'onde VHF sélectionnée par l'utilisateur pour démoduler le signal reçu. L'enveloppe qui en résulte est le signal démodulé. Un rectificateur enlève ensuite la moitié de ce signal pour former l'onde sonore originale. Cette onde est ensuite amplifiée pour être émise par le haut-parleur de votre casque d'écoute.

Les antennes

Une antenne est un conducteur connecté à un émetteur radio pour rayonner l'énergie électromagnétique produite par l'émetteur dans l'espace. Une antenne est également connectée au récepteur pour intercepter cette énergie électromagnétique et la transporter dans les circuits du récepteur, où elle est transformée en signaux pouvant être entendus et utilisés. Les caractéristiques qui font qu'une antenne est bonne pour l'émission la rendent également bonne pour la réception. Trois caractéristiques d'une antenne sont critiques : sa *longueur*, sa *polarisation* et sa *directivité*.

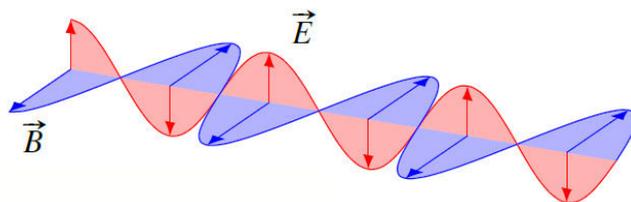
La longueur

Pour qu'une antenne soit la plus efficace, sa longueur doit être égale à la moitié de la longueur d'onde du signal transmis ou reçu, comme illustré sur la figure suivante. Cette longueur permet au courant d'antenne d'être maximal.



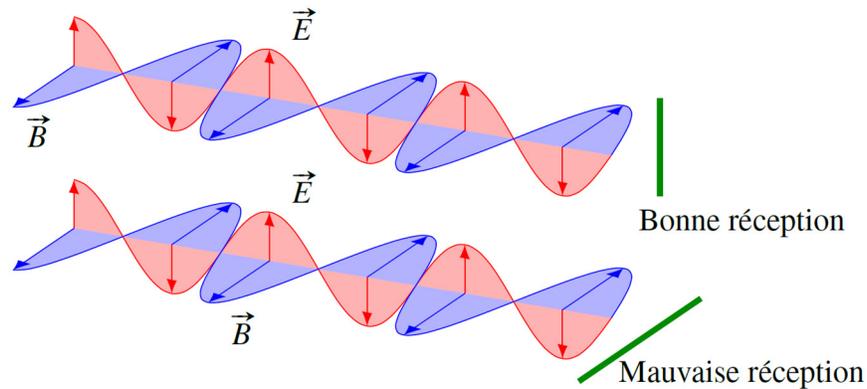
La polarisation

Les ondes servant aux télécommunications sont très souvent polarisées. Cela signifie que le champ électrique et le champ magnétique de l'onde ont toujours la même orientation. Si une onde électromagnétique est polarisée verticalement pour le champ électrique, alors la source émet une onde dont le champ électrique est toujours vers le haut ou vers le bas (ce qui implique que le champ magnétique est toujours horizontal) comme pour l'onde montrée sur cette figure.



La direction de polarisation de l'onde émise est identique à la direction de l'antenne. Si l'antenne est orientée verticalement, l'onde sera polarisée verticalement. Si l'antenne est orientée horizontalement, l'onde sera polarisée horizontalement.

Si on veut capter ces ondes avec une antenne en forme de tige, on doit orienter l'antenne dans le sens de la direction de l'oscillation du champ électrique, donc dans la direction de la polarisation, pour obtenir une bonne réception.



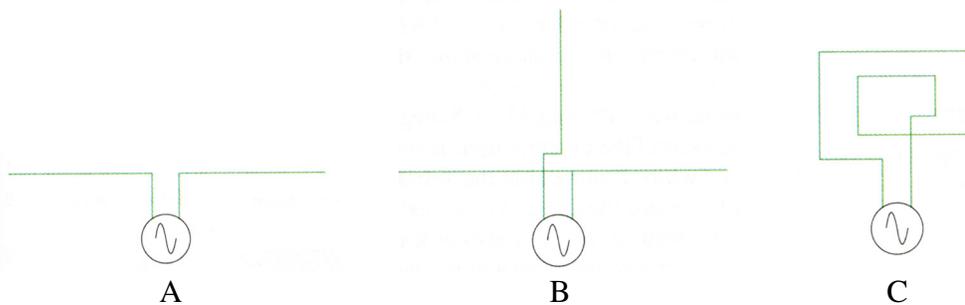
Avec la bonne orientation, le champ électrique oscille dans le même sens que l'antenne. Le champ électrique pourra alors déplacer les charges dans la direction de l'antenne et faire un courant dans l'antenne.

La plupart des communications LF, MF et HF utilisent des antennes horizontales et les systèmes à haute fréquence utilisent des antennes verticales.

La directivité

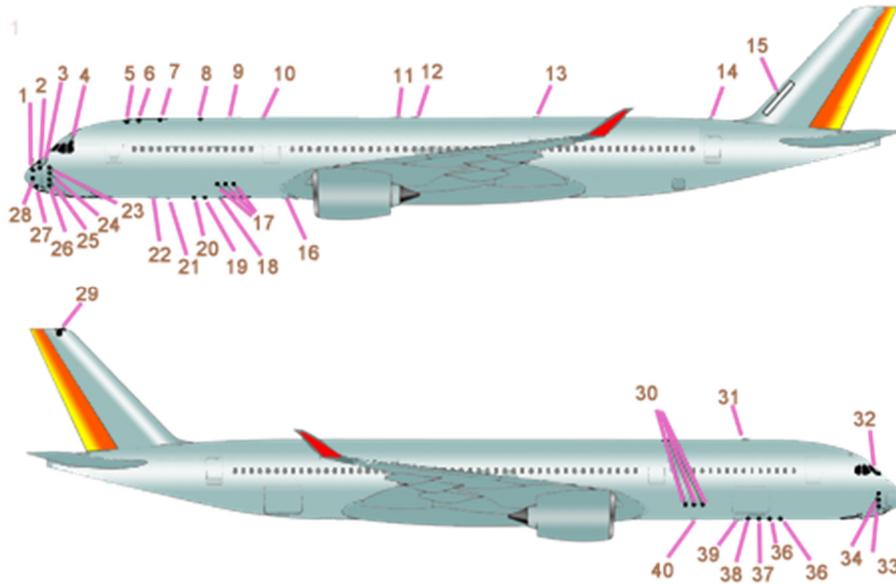
Certaines antennes émettent dans toutes les directions et d'autres émettent uniquement dans un ou certaines directions.

La figure suivante montre trois types d'antennes et leurs caractéristiques directionnelles. L'antenne dipôle en (A) transmet son signal le plus fort dans une direction perpendiculaire à sa longueur. L'antenne fouet verticale en (B) a une intensité de champ uniforme dans toutes les directions et est appelée antenne omnidirectionnelle. L'antenne-cadre en (C) est hautement directionnelle. Sa force est fortement réduite dans la direction perpendiculaire à son plan.



Le positionnement des antennes

L'image suivante vous montre la position des différentes antennes sur un avion.



www.lavionnaire.fr/RadioNavIntro.php

N°	Nom	N°	Nom
1-	LOC	21-	DME 1
2-	SSA	22-	TCAS 1 (en dessous fuselage)
3-	TAT PROBE 1,2	23-	PITOT
4-	ICE PROBE	24-	MFP 1
5-	GNSS 1	25-	AOA
6-	GNSS 2	26-	ICE PROBE DETECTOR
7-	TCAS 2 (au-dessus)	27-	GLIDE
8-	WACS	28-	WEATHER RADAR
9-	SATCOM	29-	VOR
10-	VHF 1	30-	ISP RH
11-	ADF 1	31-	TCAS 1 (au-dessus)
12-	ADF 2	32-	SSA 2, 3
13-	VHF 3	33-	ICE PROBE DETECTOR
14-	ELT	34-	MFP 2, 3
15-	HF	35-	RADIO ALT E1
16-	MARKER	36-	RADIO ALT R1
17-	ISP LH	37-	RADIO ALT R3
18-	DME 2	38-	RADIO ALT E3
19-	RADIO ALT R2	39-	TCAS 2 (en dessous)
20-	RADIO ALT E2	40-	VHF 2

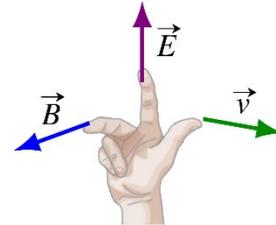
RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Direction de propagation d'une onde électromagnétique

Quand on met nos doigts de la main droite dans la direction du champ électrique et qu'on les plie dans la direction du champ magnétique, notre pouce nous donne la direction de propagation de l'onde.



Lien entre E et B dans une onde électromagnétique

$$E = Bc$$

Lien entre λ et f ou lien entre λ et T

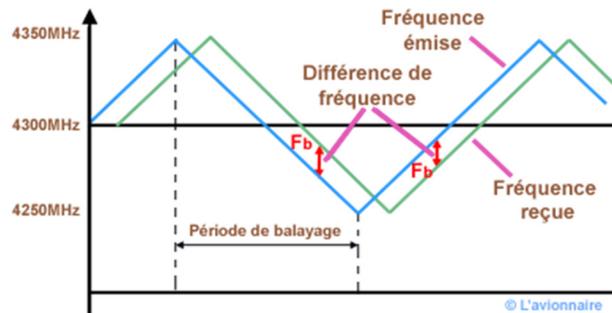
$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

EXERCICES

11.1 Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?

1. Combien de temps faut-il pour qu'une onde électromagnétique parcoure une distance de 15 km entre un aéroport et un avion ?
2. La distance entre Mars et la Terre est très variable. Au maximum, cette distance est d'environ 390 millions de km. Quand Mars est au plus loin de la Terre, un astronaute sur cette planète envoie alors un message vers la Terre. Si les personnes qui reçoivent le message sur Terre prennent 5 minutes pour répondre après la réception du message, combien s'écoulera-t-il de temps pour l'astronaute sur Mars entre l'envoi du message et la réception de la réponse ?
3. Quand une balise du système DME reçoit un signal d'un avion, elle réémet un signal $50 \mu\text{s}$ plus tard. Si, dans l'avion, on mesure qu'il s'écoule $64 \mu\text{s}$ entre l'émission et la réception d'un signal vers une balise DME, quelle est la distance entre l'avion et la balise.

4. L'altimètre radar d'un avion envoie un signal vers le sol. La fréquence de ce signal varie entre 4250 MHz et 4350 MHz comme illustré sur ce graphique.

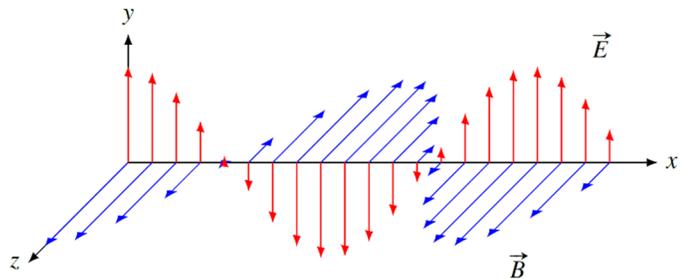


En mesurant le décalage de temps entre l'onde émise et l'onde reçue, on peut trouver l'altitude de l'avion. Si ce décalage est de $0,832 \mu\text{s}$, quelle est l'altitude de l'avion ?

5. Voici une onde électromagnétique sinusoïdale.

a) Dans quelle direction se propage cette onde électromagnétique ?

b) À un endroit et à un certain moment, le champ électrique de cette onde est de 45 N/C vers le haut. Quelles sont la grandeur et la direction du champ magnétique à cet endroit et à ce moment ?



6. Une année-lumière est une unité de distance qui équivaut à la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant un an. Quelle est cette distance en mètre ?

11.2 Le spectre électromagnétique

7. Une onde sonore a une vitesse de 350 m/s et une fréquence de 400 Hz .

- Quelle est la période de l'onde ?
- Quelle est la longueur d'onde de l'onde ?

8. Une onde électromagnétique a une fréquence de 10^{15} Hz . Dans quelle région du spectre électromagnétique retrouve-t-on cette onde ? (Radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X ou rayons gamma ?)

11.3 Les fréquences utilisées en aviation

9. Les transpondeurs utilisent une onde ayant une fréquence de 1030 MHz.
- Quelle est la période de l'onde ?
 - Quelle est la longueur d'onde de l'onde ?

11.5 Les principes de base de la radio

10. Quelle devrait être la longueur d'une antenne utilisée pour émettre les ondes du système LORAN C ?

RÉPONSES

11.1 Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?

- 50 μs
- 48 min 20 s
- 2,1 km
- 124,8 m
- a) vers la droite b) $1,5 \times 10^{-7}$ T
- $9,467 \times 10^{15}$ m

11.2 Le spectre électromagnétique

- a) 0,002 5 s b) 0,875 m
- La longueur d'onde de 300 nm correspondant aux ultraviolets.

11.3 Les fréquences utilisées en aviation

9. a) $9,709 \times 10^{-10}$ s b) 0,2913 m

11.5 Les principes de base de la radio

10. 1500 m