

Oscillations et ondes

1. Mouvement périodique d'une source en vibration

1.1 Oscillation d'un objet

1.1.1 Phénomènes périodiques

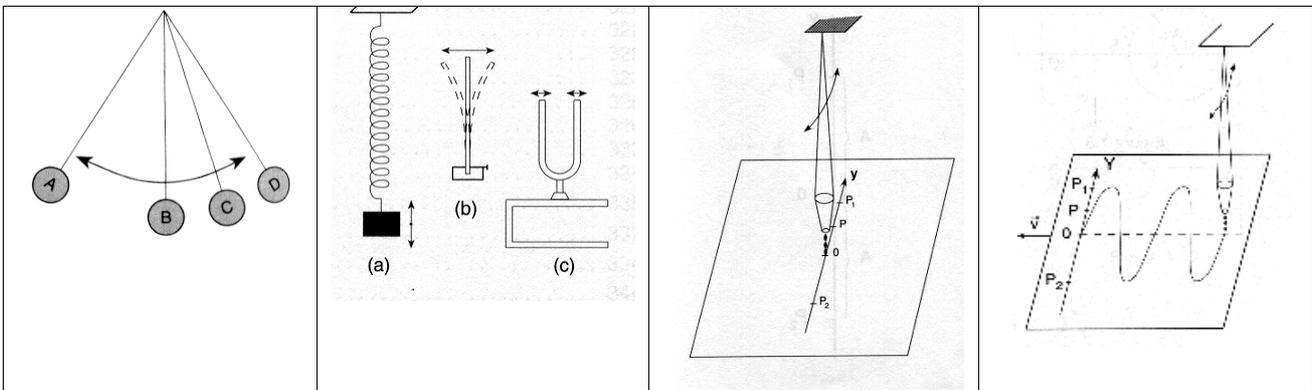
Nous connaissons des phénomènes de la vie courante qui se répètent régulièrement ; le mouvement de la lune autour de la Terre, celui de la Terre autour du Soleil, celui d'une balançoire, celui d'un piston, l'oscillation d'un ressort et l'oscillation d'un pendule,....

Un mouvement est dit périodique s'il se reproduit identique à lui-même au bout d'intervalles de temps égaux.

1.1.2 Mouvements d'oscillation

Parmi les mouvements périodiques, nous intéresserons aux objets effectuant des oscillations périodiques de part et d'autre d'une position d'équilibre.

Exemples : masse suspendue à un ressort, pendule, diapason frappé, lame vibrante,..

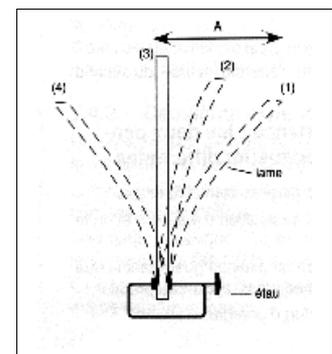


Regardons en détails, l'oscillation d'un pendule laissant « une trace sur son passage » et définissons les termes suivants :

Oscillateur : objet décrivant un mouvement de va et vient de part et d'autre d'une position d'équilibre 0

Oscillation : mouvement de l'oscillateur

L'élongation y : distance qui sépare l'objet de sa position d'équilibre 0



Amplitude A : valeur maximale de l'élongation y

Période T : durée d'une oscillation complète (temps pour aller d'un point et y revenir dans le même sens). La période T se mesure en seconde (s)

**Fréquence f : nombre d'oscillations effectuées en une seconde. Elle se mesure en hertz (Hz)
 $1\text{hz} = 1 \text{ vibration / s}$**

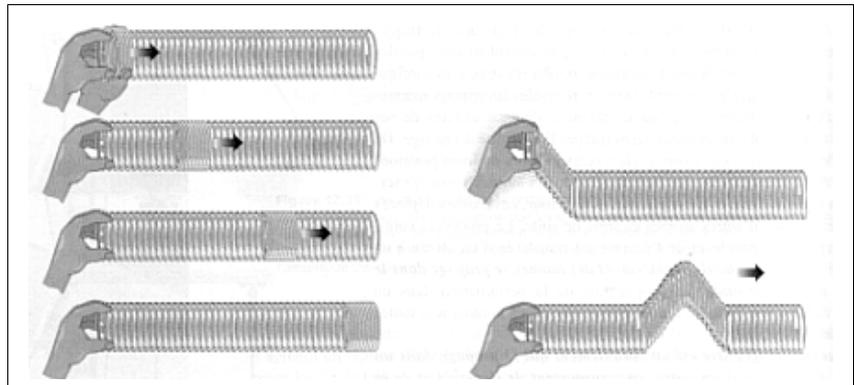
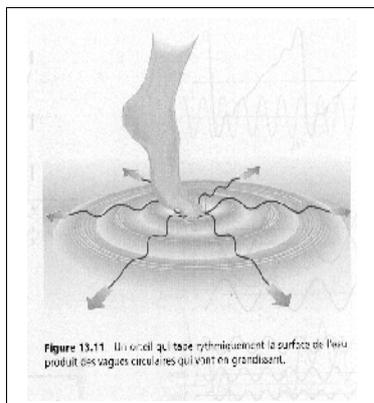
Exemple

Supposons que le pendule mette 0,5 s pour faire le trajet [1-2-3-4-3-2-1] , alors sa période T est de 0,5s. Ce pendule effectue donc une oscillation en une demi-seconde.
 Il fait donc 2 oscillations pendant 1 seconde. Sa fréquence est de 2 Hz

La fréquence f et la période T sont liées par la relation $f = 1 / T$

2. Les ondes

2.1 Introduction



Un caillou ou une goutte tombant à la surface de l'eau produit une déformation à l'endroit de l'impact et on observe la formation d'une ride circulaire qui se propage à la surface de l'eau autour de ce point.

Un cri ou une explosion produit de minuscules déplacements de particules d'air accompagnés de faibles modifications de pression (onde acoustique).

A l'extrémité d'un ressort, on peut provoquer une perturbation (à l'aide de la main) qui se propage le long de celui-ci.

Il y a transfert d'énergie de proche en proche.

2.2 Définition d'une onde

Pour chaque exemple cité, une propriété physique (position, pression,...) du milieu a été modifiée localement et temporairement. La perturbation se propage de proche en proche à

travers un milieu élastique capable de se déformer. Chaque point va reproduire la perturbation émise à l'origine.

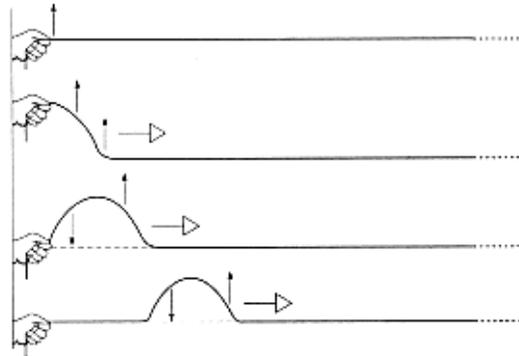
On appelle *onde progressive*, un transfert d'énergie sans transport de matière grâce à la propagation de proche en proche d'un signal à travers un milieu élastique.

2.2.1 Onde transversale

L'onde est dite *transversale* lorsque la déformation est \perp à la direction de propagation de l'onde

Exemples :

- onde produite par un objet à la surface de l'eau
- onde produite sur une corde

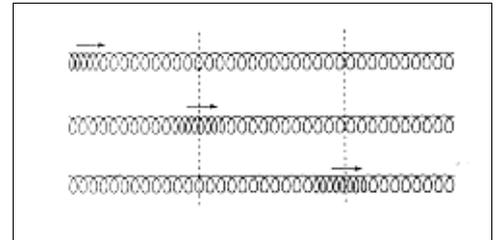
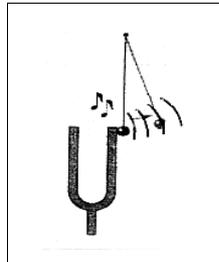


2.2.2 Onde longitudinale

L'onde est dite *longitudinale* lorsque la déformation est // à la direction de propagation de l'onde.

Exemples :

- onde produite sur un ressort
- ondes sonores



2.3 Vitesse d'une onde

L'expérience montre que la vitesse V avec laquelle la perturbation se propage à *une valeur finie*.

Cette vitesse :

- *dépend des caractéristiques du milieu*

Exemples

La vitesse des ondes sonores

331 m/s à 0°C dans l'air

340 m/s à 15°C dans l'air

1500 m/s à 15°C dans l'eau

3570 m/s dans la fonte

- *dépend de la nature du signal*

Exemples

les ondes acoustiques dans l'air 340 m/s

les ondes radio et lumineuses dans l'air $3 \cdot 10^8$ m/s

- *ne dépend pas de l'amplitude du signal initial*

2.4 Longueur d'onde

On appelle longueur d'onde λ d'une onde, la distance parcourue par l'onde pendant une période T .

$$\lambda = V \cdot T = \frac{V}{f}$$

λ dépend de la source par la fréquence f d'oscillation de celle-ci

λ dépend du milieu par la vitesse V de propagation

3. Les ondes acoustiques

3.1 Production des ondes sonores

3.1.1 Origine d'un son

Les émetteurs sonores

la voix (cordes vocales) , cordes de guitare, violon,..

membrane d'un haut-parleur, tambour

cloche, verre de cristal

instrument à vent,...

Expériences

Diapason + billes de frigolite avec et sans son

HP en fonctionnement + billes de frigolite avec et sans son

Latte tendue au bord d'une table

Flûte de musicien

Conclusions

Le son est produit par des objets qui vibrent.

Pour se propager, les vibrations sonores initiales ont besoin d'un milieu matériel : solide, liquide ou gaz. Le son ne se propage pas dans le vide (comme l'espace).

3.2 Caractéristiques d'un son

3.2.1 Intensité

Elle distingue un son fort d'un son faible.

Elle dépend de la source mais aussi de la distance entre la source et l'auditeur.

L'expérience montre que plus l'amplitude de la vibration est grande plus le son est fort.

(Rappel : *amplitude = écart maximum par rapport à la position d'équilibre*).

L'intensité se mesure en décibel. (voir tableau)

Echelle des décibels
(Voir Tableau)

Intensité (dB)	Sortes de bruits
170	A la sortie d'un réacteur d'avion
160	Rupture du tympan
140	Décollage d'un avion à réaction
120	Seuil de douleur
115	Klaxon d'auto à 1 m
110	Dancing / écouteurs d'un walkman au max
90	Atelier d'usine bruyant
80	Vélocycle avec pot correct
70	Cri
65	Conversation normale
35	Chants des oiseaux
30	Murmures
15	Tic tac d'une horloge
0	Seuil d'audition

Remarque

Notons que notre oreille peut réceptionner des bruits de très forte puissance.

En effet il faut savoir que si 1 objet émet un son de x dB alors 2 objets émettent un son de $x + 3$ dB alors $5x + 7$ dB

Si on multiplie la source par 2, on augmente l'intensité de 3 dB
Si on multiplie la source par 10, on augmente l'intensité de 10 dB

3.2.2 Hauteur d'un son

Elle distingue un son aigu d'un son grave.

Elle est liée à la fréquence de la vibration. [Grave = basse fréquence et Aigu = haute fréquence]

(rappel ; fréquence = nombre de vibrations par seconde. ($1 \text{ vib} / \text{s} = 1 \text{ hertz} = 1 \text{ Hz}$))

L'oreille humaine est sensible aux sons compris entre 16 Hz et 20.000 Hz. (gamme des sons audibles)

Au-dessus de 20.000Hz, on trouve les ultra-sons auxquels les chiens, les dauphins et les chauves-souris sont sensibles et en dessous de 20 Hz, on trouve les infrasons

3.2.3 Timbre

Deux sons de même fréquence émis par deux instruments de musiques différents nous paraissent complètement différents à l'audition.

Ainsi le « la » de fréquence $f = 442$ Hz joué par une flûte n'est pas identique au « la » joué par une clarinette.

La note de musique est un ensemble de sons de fréquence différente.

La première fréquence = fréquence **fondamentale** = 442Hz

Elle est accompagnée par une ou plusieurs **harmoniques** qui sont des sons de fréquence multiple de la fondamentale ($H_1 = 2f = 884$; $H_2 = 3f = 1326$; $H_3 = 4f = 1768$)

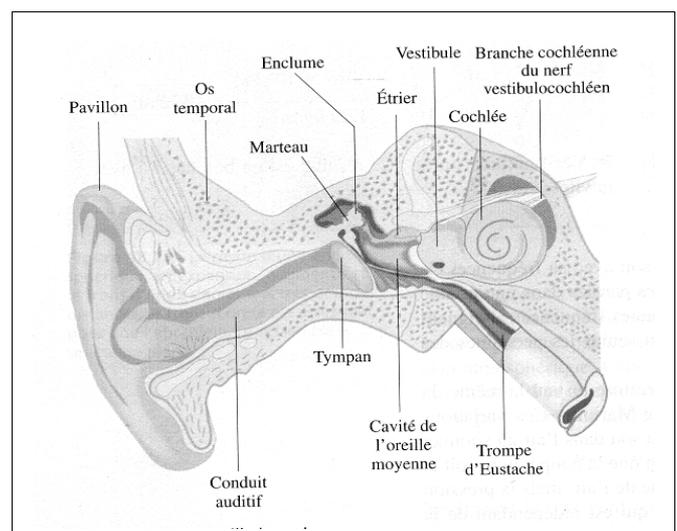
Ainsi la flûte possède 12 harmoniques alors que la clarinette en émet 30 ce qui fait que les sons émis par ces 2 instruments ne sont pas les mêmes.

3.3 Perception des sons : l'oreille

3.3.1 l'oreille

Le pavillon capte les sons et les dirige vers le conduit auditif externe jusqu'au tympan qui se met à vibrer. Pour amplifier ces vibrations, 3 os (l'étrier, le marteau et l'enclume) oscillent avec le tympan.

Ils communiquent avec la cochlée dans laquelle l'énergie sonore est convertie en signaux électriques qui sont envoyés au cerveau via le nerf auditif.



3.3.2 Les dangers

La cochlée est formée de capteurs sensibles aux vibrations : ce sont les cils qui trempent dans le liquide cochléen. Les cils du début sont sensibles aux sons aigus et les cils de fond sont sensibles aux sons graves.

Suite au bruit trop intense (oreillette trop près du tympan, discothèque,...) certains cils peuvent se casser et l'information envoyée au cerveau est erronée.

Le risque encouru à cause des bruits augmente avec le niveau d'intensité sonore et la durée d'exposition au bruit.

Il dépend aussi de la fréquence: les sons aigus sont plus gênants que les sons graves.

L'exposition à un bruit de niveau sonore inférieure ou égale à 80 dB pendant 8 heures par jour est considérée comme un seuil de sécurité. Pour une intensité doublée (donc 3 dB en plus), la durée d'exposition devrait être réduite de moitié.

Les bruits de niveau inférieur à 80 dB sont néanmoins déjà gênants; ils peuvent engendrer

- des difficultés de concentration;
- une diminution de la capacité de raisonnement;
- une perturbation du sommeil;
- une fatigue auditive (sifflement, ou bourdonnement d'oreille, difficulté ou perte d'audition, ...).

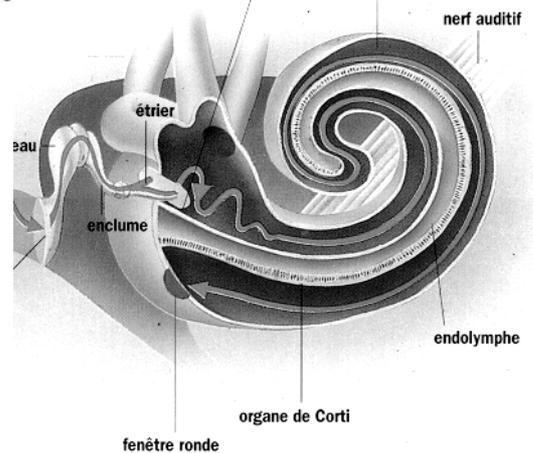
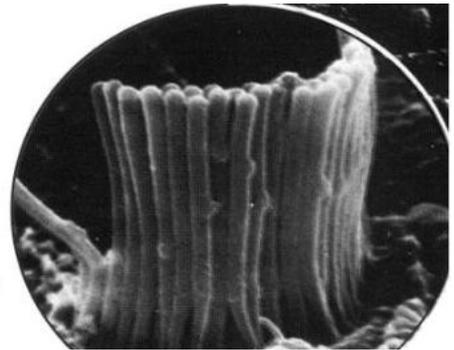
Ces effets sont temporaires et s'estompent assez lentement.

À partir de 85 - 90 dB, le niveau sonore devient dangereux, nocif. Les cellules nerveuses, qui transforment les signaux acoustiques en signaux électriques, peuvent être endommagées de manière irréversible, entraînant une perte partielle mais définitive d'audition.

À partir de 140 dB, certains bruits fort intenses, surtout s'ils sont soudains (explosion; proximité d'un réacteur d'avion ou d'un canon) peuvent provoquer une surdité par rupture du tympan ou en endommageant l'oreille interne.

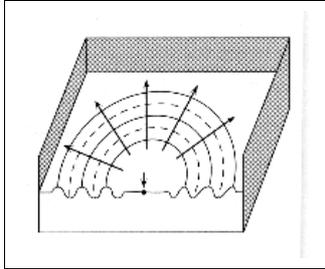
En Belgique, un arrêté royal limite à 90 dB le niveau sonore dans les discothèques et salles de concert. Selon une enquête de Test - Santé (1995), aucune des 12 discothèques vérifiées ne respectait la loi; le niveau sonore sur les pistes de danse, ainsi que lors des concerts rock, était compris entre 100 et 110 dB...

Ces photographies prises sous microscope électronique montrent trois rangées de cellules auditives ciliées (à droite) dont on voit les cils rigides (à gauche). C'est l'oscillation de ces cils qui stimule la cellule auditive à produire une impulsion électrique destinée à informer le c



4. Propriétés des ondes

4.1 Introduction



Les propriétés des ondes seront étudiées avec des ondes à la surface de l'eau et ce dans une cuve à ondes. Un vibreur crée des perturbations entretenues à la surface et les ondes générées sont visualisées par projection.

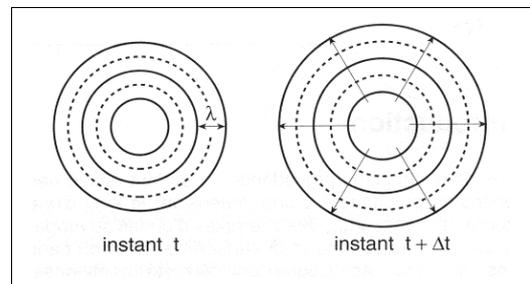
Suivant la forme du vibreur, on créera des ondes planes ou des ondes circulaires.

Onde circulaire

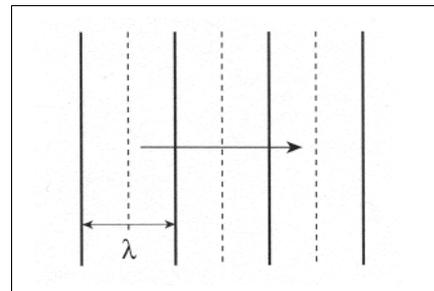
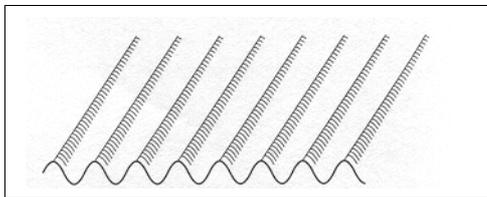
Les traits pleins représentent les sommets et les traits en pointillés représentent les creux de « la vagues ».

Deux traits pleins sont séparés d'une longueur d'onde λ

Plus les traits sont espacés, plus la longueur d'onde de l'onde est grande.



Onde plane



La direction de propagation est perpendiculaire aux crêtes.
Tant qu'aucun obstacle ne se trouve sur le chemin de l'onde, celle-ci se propage en ligne droite.

4.2 Réflexion des ondes

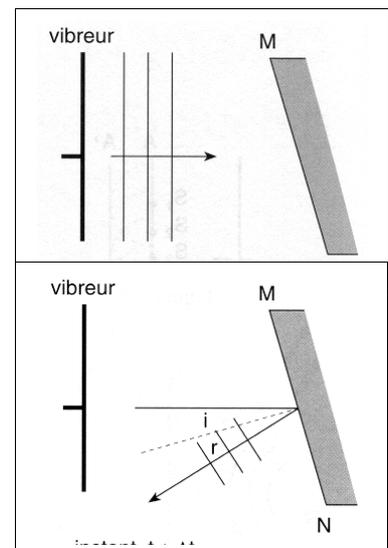
4.2.1 Expérience

Analysons le comportement de l'onde lorsqu'elle rencontre un obstacle qui arrête sa progression.

Réflexion : changement de direction que subit l'onde incidente lorsqu'elle rencontre un obstacle.

4.2.2 Conclusions

Les ondes peuvent être réfléchies par des obstacles.



La réflexion se passant dans le même milieu et sur un obstacle fixe, les ondes réfléchies ont la même longueur d'onde λ , la même vitesse V et la même fréquence f que l'onde incidente. L'angle d'incidence i (angle entre la direction de propagation de l'onde incidente et la normale au point d'incidence) et l'angle de réflexion r (idem pour l'onde réfléchie) sont égaux.

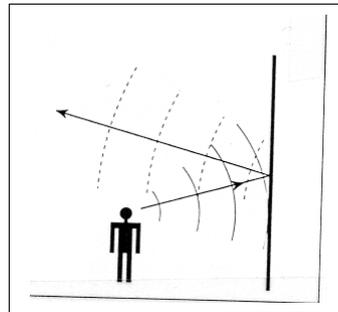
4.2.3 Applications

Les ondes sonores () ont les mêmes propriétés que les ondes à la surface de l'eau.

Rappel : $V_{\text{son}} = 340 \text{ m/s}$ à 15°C

L'écho

Un auditeur peut percevoir distinctement l'écho à la condition suivante : il faut que l'intervalle de temps entre la perception du son émis et la perception du son réfléchi soit au moins de 0,1 s. L'onde sonore parcourt alors une distance totale qui vaut : $d = 340 \cdot 0,1 = 34 \text{ m}$. La surface réfléchissante doit donc se trouver au moins à 17 m de la source (fig. 6.15).



Réflexion dans une salle

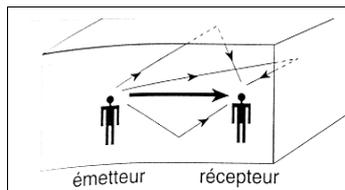


Figure 6.16

Reflexion du son dans une salle

Dans une salle, il existe de multiples possibilités de réflexion : sur les murs ou les objets qui s'y trouvent. En se limitant à trois réflexions possibles l'auditeur recevra quatre signaux sonores (d'intensité variable) à partir d'un seul émetteur (fig. 6.16). On conçoit que le phénomène puisse donner lieu à une mauvaise audition.

Dans une pièce meublée, l'audition est meilleure parce que la plupart des objets (rideaux principalement) absorbent les sons et empêchent leur réflexion.



Dans une salle d'enregistrement ou de spectacles, on évite les réflexions en tapissant les murs avec des matériaux « brisés », non plats

Le sonar

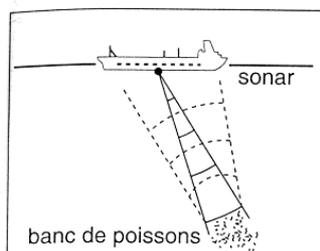


Figure 6.17

Sonar est l'abréviation de « **SO**und **NA**avigation and **R**anging » ou Navigation et Repérage par le Son.

En milieu marin, les ondes acoustiques constituent le seul support valable pour la transmission de l'information. En effet, la lumière n'a qu'un faible pouvoir de pénétration dans l'eau et les ondes radio sont considérablement affaiblies lorsque la distance augmente.

La fréquence du sonar est de plusieurs dizaines de kilohertz; il n'émet pas en continu mais par brèves impulsions. Lorsque l'onde ultrasonore rencontre un obstacle, elle est réfléchie et reçue par un appareil d'écoute (fig. 6.17). L'intervalle de temps qui s'écoule entre le signal émis et le signal reçu permet de calculer la distance de l'obstacle.

L'échographie

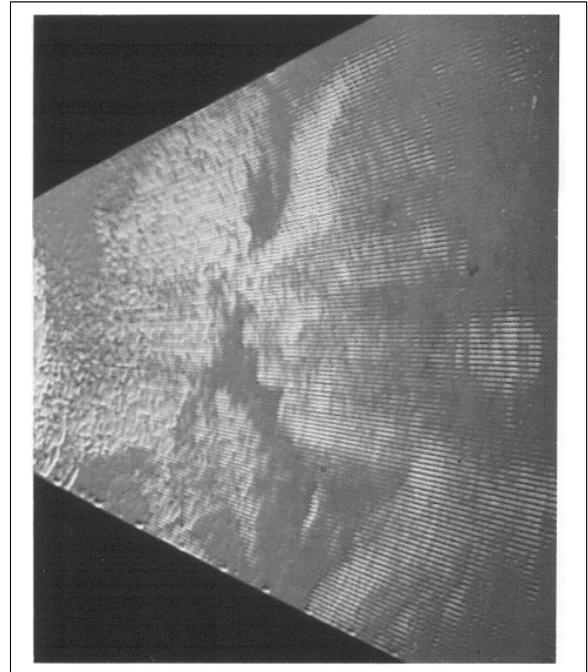
A ne pas confondre avec la radiographie qui se fait avec de rayons X (voir ondes EM), l'échographie se réalise avec des ultrasons

L'échographie est un moyen d'investigation médicale non traumatisant pour le patient et permet d'émettre ou de confirmer certains diagnostics. Cette méthode est basée sur le fait que les ultrasons se réfléchissent de façon plus ou moins importante selon la nature des milieux rencontrés.

L'émetteur - récepteur d'ultrasons est placé en contact étroit avec la peau: un gel est utilisé pour éviter une réflexion presque totale à la frontière air - peau. L'émetteur produit des ondes pendant une courte durée, et ensuite détecte les éventuelles ondes réfléchies. En effet, chaque fois que ce faisceau ultrasonique rencontre une frontière entre deux tissus différents, il se réfléchit partiellement.

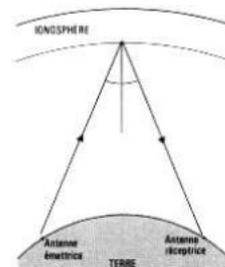
La partie non réfléchi continue son chemin, et peut être réfléchi plus loin.

Les différents échos, d'autant plus retardés qu'ils ont été produits par des couches plus profondes, sont transformés en signaux électriques et ensuite visualisés sur un écran de contrôle



Toutes les ondes se réfléchissent, même les ondes radio (voir onde EM)

On utilise cette propriété pour véhiculer les ondes radio dans le monde entier, pour faire des contrôles de vitesse (voir effet Doppler)



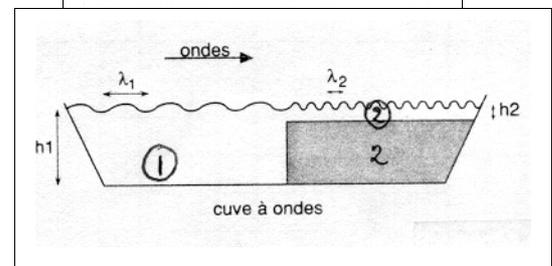
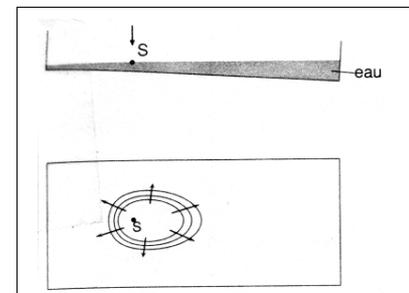
Réflexion des ondes radio sur l'ionosphère.
Localement, le miroir, secteur sphérique, peut être assimilé à un miroir plan.

4.3 Réfraction des ondes

Dans cette partie, nous allons voir comment se comporte une onde lorsqu'elle rencontre un second milieu dans lequel la vitesse de l'onde est différente de celle du premier milieu.

4.3.1 Expériences

Pour créer 2 milieux de vitesses différentes, on place dans la cuve une plaque dont le but est de diminuer la profondeur de l'eau dans le milieu 2. La diminution de profondeur a pour effet de générer des interactions entre le fond et l'eau afin de diminuer la vitesse de l'onde dans la seconde partie de la cuve. (donc $V_1 > V_2$ car $h_1 > h_2$).

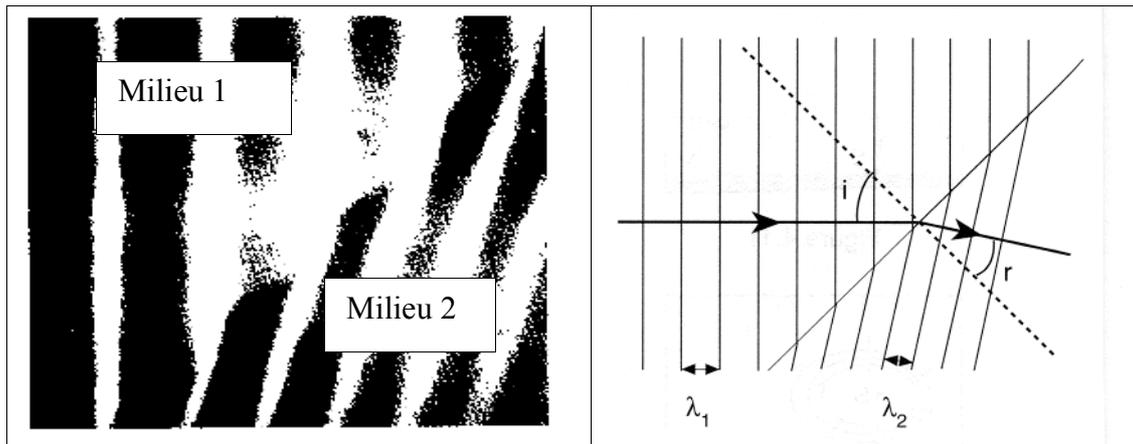


4.3.2 Conclusions

Réfraction : changement de direction de l'onde incidente lorsqu'elle pénètre dans un milieu de vitesse différente.

Si $V_1 > V_2$ alors $i > r$ et $\lambda_1 > \lambda_2$

Si $V_1 < V_2$ alors $i < r$ et $\lambda_1 < \lambda_2$



4.3.3 Applications

On sait que le son se propage plus loin la nuit que le jour. Pourquoi cette différence ?

Durant la journée, la température de l'air diminue quand on s'élève. Or la vitesse du son diminue quand la température diminue. Nous avons vu que lorsque la vitesse d'une onde diminue, l'onde se réfracte de telle sorte que l'angle r de l'onde réfractée soit inférieur à l'angle i de l'onde incidente (fig. 6.26). Le phénomène se répète de couche en couche et l'onde sonore s'écarte du sol.

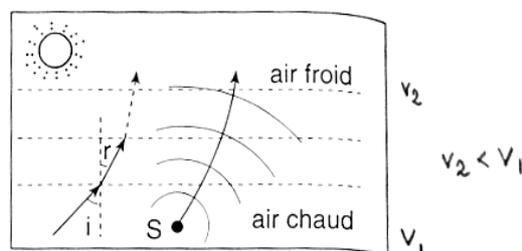


Figure 6.26

Durant la nuit le phénomène inverse se passe: la température de l'air augmente quand on s'élève. En effet, le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère. La vitesse de l'onde réfractée est plus grande et l'angle r est plus grand que l'angle i . De couche en couche, l'angle i augmente et par conséquent l'angle r . À un moment donné, il y a réflexion totale; l'onde se rapproche du sol et le son porte plus loin (fig. 6.27).

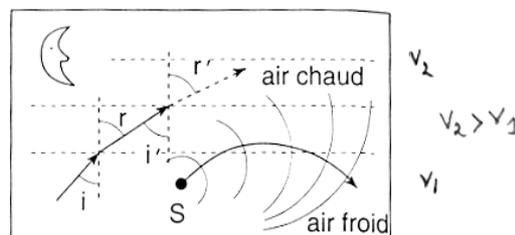


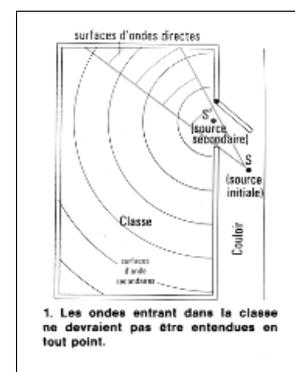
Figure 6.27

C'est pour cette raison que lors d'un orage (au-delà de 20 km), si l'air est plus chaud au niveau du sol, on peut voir l'éclair sans jamais entendre le tonnerre. Le foyer de l'orage se situe souvent vers 4 km d'altitude et le son au lieu de se diriger vers le sol, grimpe lentement vers le haut et n'atteint jamais un observateur lointain au sol.

4.4 La diffraction des ondes

Tant qu'une onde ne change pas de milieu ou ne rencontre pas d'obstacle, elle se propage en ligne droite. Que se passe-t-il lorsqu'elle passe près d'obstacle ?

Nous entendons facilement au milieu de la classe, des bruits venant du couloir lorsque la porte est ouverte. De même, nous percevons très bien des bruits provenant de l'extérieur et ce par une fenêtre ouverte. Une onde ne devrait-elle pas être arrêtée par un obstacle ?



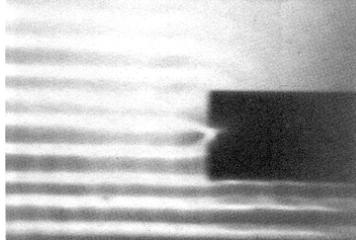
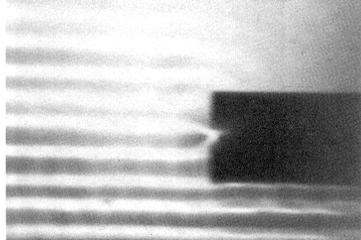
4.4.1 Expérience

Les ondes se propagent du bas vers le haut.

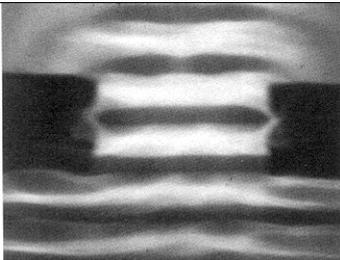
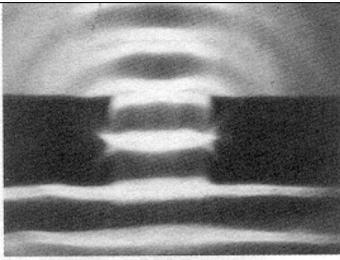
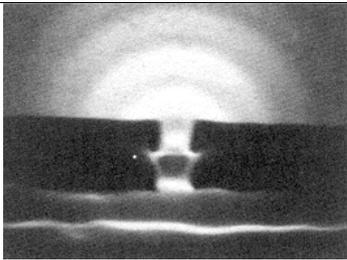
On constate que les ondes qui passent à côté de l'obstacle sont déviées de leur direction initiale.

La diffraction : déviation des ondes dans plusieurs directions par des obstacles. Les ondes contournent les obstacles, elle ne se propage plus en ligne droite.

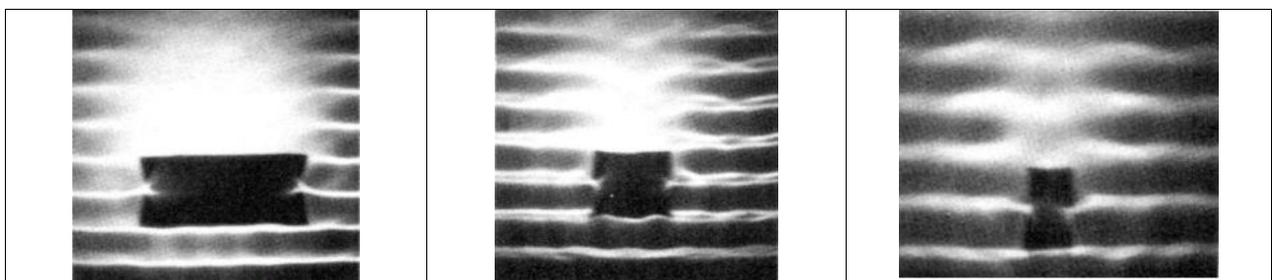
4.4.2 Conclusions

	
<p>La diffraction est un phénomène qui dépend de la longueur d'onde λ. En effet, elle apparaît fort peu lorsque λ est beaucoup plus petite que la largeur de l'obstacle. Dans ce cas, l'onde continue en ligne droite et derrière l'objet, on perçoit très peu d'onde diffractée.</p>	<p>Lorsque λ est égale ou supérieure aux dimensions de l'objet, il y a beaucoup de diffraction derrière l'obstacle.</p>

Passage à travers une fente

		
<p>Si λ est petite (par rapport aux dimensions de la fente), il y a peu de diffraction</p>	<p>Plus λ augmente, plus on observe des ondes derrière l'objet.</p>	<p>Si λ est grande (par rapport aux dimensions de la fente), il y a beaucoup de diffraction</p>

Obstacle



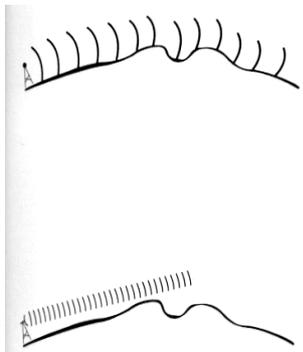
Même conclusions.

A noter (3eme cas), **lorsqu'il y a beaucoup de diffraction (λ très grand), l'onde continue sa propagation comme si l'obstacle n'existait pas, il n'y a plus « d'ombre » derrière l'objet et il devient « invisible » pour ces ondes.**

A noter que le phénomène de diffraction est une propriété qui prouve la nature ondulatoire d'un phénomène.

4.4.3 Applications

Réception des ondes radio



Grâce à la diffraction, les ondes kilométriques (France Inter, RTL)

- suivent la courbure de la Terre et sont reçues à 1000 km de la source
- peuvent être reçues au fond d'une vallée.

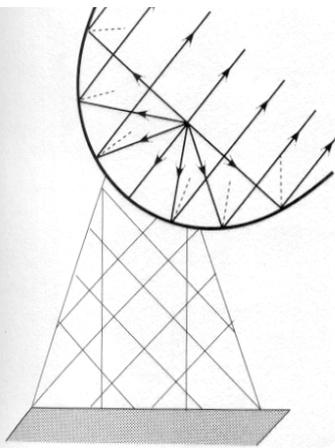
En effet, la longueur d'onde est bien supérieure aux obstacles.

Par contre, pour les ondes métriques (FM), décimétriques (TV), la visibilité optique directe est nécessaire entre antenne émettrice et récepteur :

- ces ondes ne suivent pas la courbure de la Terre
- elles sont difficilement reçues au fond d'une vallée.

En effet, des obstacles de 100 m par exemple (colline) sont beaucoup plus importants que la longueur d'onde ; il n'y a pas de diffraction, mais propagation rectiligne.

Faisceaux d'ondes radio



En plaçant l'antenne émettrice au foyer d'un **réflecteur parabolique**, il est possible de créer un faisceau presque parallèle : presque toute l'énergie émise partira dans une seule direction (vers un satellite, vers un relais, ...).

Il faut cependant que la longueur d'onde soit beaucoup plus petite que le diamètre du réflecteur, pour qu'il y ait une proportion importante d'ondes réfléchies ; en effet, si le réflecteur était trop petit, il y aurait beaucoup de diffraction, les ondes contourneraient le réflecteur et ne seraient pas réfléchies.

La même remarque vaut pour des antennes paraboliques réceptrices.

Echo-location

Certains animaux émettent des ondes acoustiques et ensuite captent les ondes réfléchies par les objets environnants, détectant ainsi les obstacles et proies éventuelles. Il faut pour cela que la longueur d'onde soit inférieure aux dimensions de l'obstacle à détecter. Il faut donc ici peu de diffraction).

En effet, si la longueur d'onde était plus grande que les objets, il y aurait trop de diffraction derrière celui-ci et il y aurait peu d'onde réfléchi.

C'est pour cela que les dauphins et chauve-souris émettent des ondes acoustiques de fréquence élevée et donc de longueur d'onde très faible : ce sont des ultrasons ($f = 50.000\text{Hz}$)

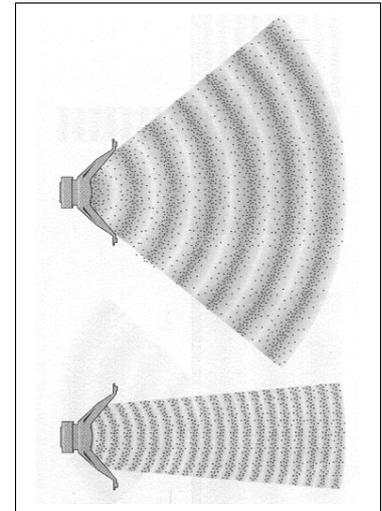
C'est aussi le principe du sonar et du radar.

Dimensions d'un HP

Un HP se comporte comme une fente traversée par une onde.
 Un HP de diamètre 0,15 m envoie une onde d'une fréquence de 1000 Hz. ($\lambda = v/f = 3,4$ m)

On est dans le cas où λ est grande devant les dimensions de l'obstacle, donc on a beaucoup de diffraction.

Par contre si $f = 10.000$ Hz alors $\lambda = 0,03$ m = 3 cm alors λ est « petit » devant les 15 cm du HP et l'onde fille en ligne droite.
 C'est pour cela que les HP de gros diamètres sont utilisés pour les sons graves et les HP de faible diamètre, pour les sons aigus.



4.5 Résonance

Dans ce chapitre, nous allons voir comment l'énergie d'un oscillateur peut être transférée à un autre oscillateur.

4.5.1 Le pendule simple

On sait qu'un pendule écarté de sa position d'équilibre peut si on le lâche, effectuer des oscillations libres avec une période propre (ou une fréquence propre).

Les oscillations se poursuivent jusqu'au moment où l'énergie potentielle de départ aura complètement disparue, absorbée par le milieu extérieur au cours de l'amortissement.

Si on désire que les oscillations continuent, il faut que le système oscillant reçoive de l'énergie du monde extérieur et ce pour compenser l'amortissement.

On parlera d'oscillations entretenues. (balançoire, cloche,)

4.5.2 Définitions

On appelle

résonateur : le système qui reçoit de l'énergie (la cloche)

excitateur : le système qui fournit de l'énergie périodiquement (le sonneur de cloche)

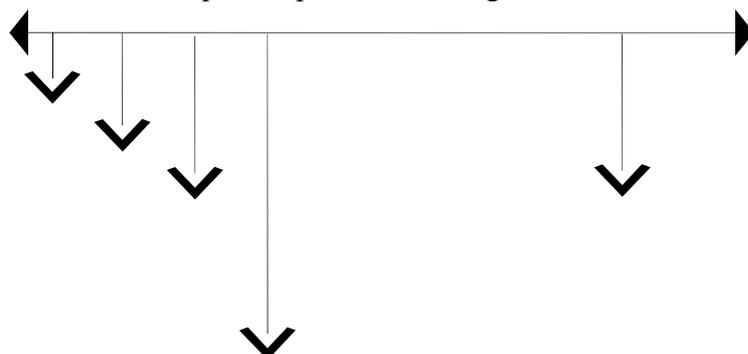
le couplage : la liaison entre le résonateur et l'excitateur (la corde)

Nous allons voir que ce transfert d'énergie entre l'excitateur et le résonateur n'est maximum que dans le cas où une condition est réalisée : **la condition de synchronisation**.

4.5.3 Expériences

Prenons 4 pendules de longueurs L_1, L_2, L_3, L_4 différentes donc de fréquences propres différentes. Suspendons les à une corde rigide.

Prenons un cinquième pendule de longueur L_3



Si on écarte le 5, il oscille. On constate alors que son amplitude diminue alors que le 3 se met à osciller graduellement.. Les 1, 2, 4 restant pratiquement immobiles.

Donc l'énergie de 5 (= excitateur) se transmet progressivement sur le 3 (= résonateur) par l'intermédiaire de la corde (= couplage).

On appelle résonance : le transfert maximum d'énergie.

L'énergie se transmet entre les systèmes qui ont la même fréquence propre d'oscillation ou de vibration.

Entre les systèmes qui ont des fréquences propres différentes, il n'y a pas ou peu de transfert d'énergie.

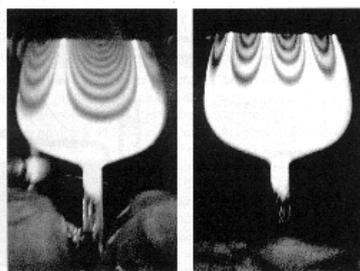
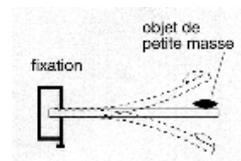
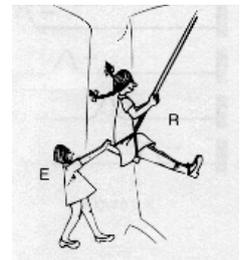
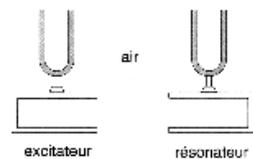
Conclusion

Il y a résonance lorsque la fréquence propre du résonateur est égale à la fréquence propre de l'excitateur.

Le transfert d'énergie a donc un caractère sélectif : le résonateur absorbe l'énergie de façon préférentielle à sa fréquence propre.

4.5.4 Applications

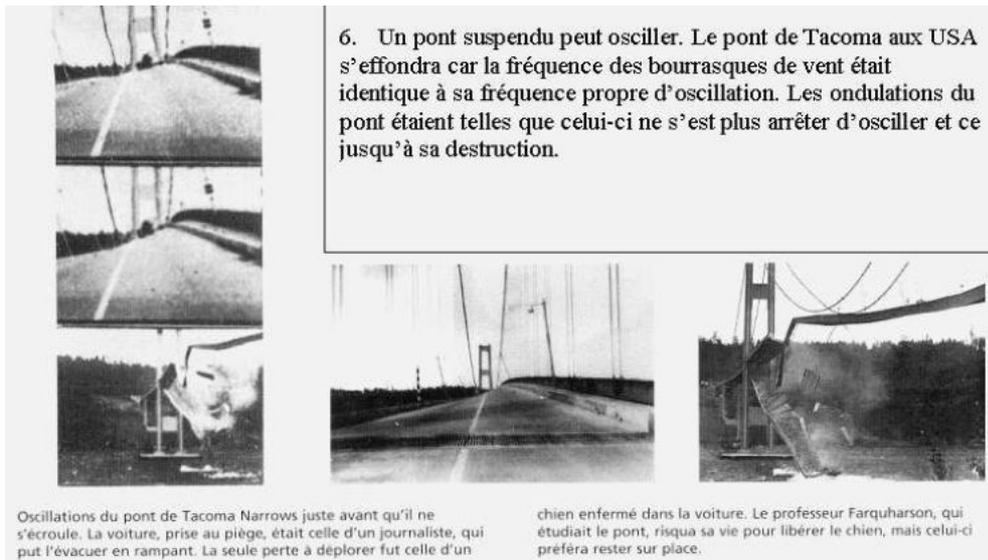
1. Résonance acoustique : 2 diapasons entre en résonance s'ils sont rigoureusement identiques
2. Balançoire : Le pousseur (excitateur) communique à la balançoire (résonateur) des impulsions périodiques et ce avec une fréquence égale à celle des oscillations de la balançoire.
3. Masse d'eau dans un récipient : l'eau dans une baignoire a une fréquence propre d'oscillation. Des mouvements périodiques de la main la font osciller et peuvent la faire déborder
4. Pièces de voiture : rétroviseur, changement de vitesse, vitre, volant, ... peuvent vibrer lorsque la voiture a une vitesse déterminée : ce qui correspond à une vitesse de rotation du moteur bien déterminée.
5. Verre en cristal émet un son si on le frotte à une certaine vitesse.



Un verre à vin oscillant selon deux de ses modes possibles. La région brillante de la photo est la partie du verre qui ne vibre pas. Les photos ont été prises à partir d'hologrammes interférométriques.



Un homme jouant un air dans une rue de New Orleans en faisant résonner des verres calibrés de différentes tailles. L'instrument, appelé « Glass harmonica », a été utilisé par Mozart.



7. On casse le pas en passant sur un pont pour ne pas avoir une fréquence particulière égale à celle du pont.
8. Les bateaux sont équilibrés pour que leur fréquence propre soit supérieure à celle de laoule.
9. Une voiture montée sur ressorts peut entrer en résonance avec les bosses de la route. Pour l'éviter, on lui met des amortisseurs.

4.6 L'effet Doppler

4.6.1 Définition

Lorsque dans une course automobile, les voitures passent devant nous, nous entendons clairement le bruit du moteur d'abord aigu, puis grave lorsqu'elles nous ont dépassés. Ce phénomène est très perceptible aussi avec un avion ou même une ambulance. Cet effet se superpose à la variation d'intensité du bruit.

Cet effet fut découvert en 1842 par Christian Doppler à propos des ondes sonores et puis par Fizeau en 1848 à propos des ondes lumineuses.

On appelle effet Doppler (Fizeau) : la modification de la fréquence du son perçu due au mouvement de la source ou de l'observateur ou des 2 à la fois.

Le son est plus aigu si la source s'approche de l'observateur plus grave si la source s'éloigne der l'observateur

4.6.2 Formule

$f' = f \frac{V - V_0}{V - V_S}$	f'	fréquence du son perçu par l'observateur
	f	fréquence du son émis par la source
	V	vitesse du son dans l'air
	V_0	vitesse de l'observateur
	V_S	vitesse de la source (sens + de S vers O)

Avec une trajectoire orientée positivement de la source S vers l'observateur O

L'effet Doppler est un effet qui est observé pour toutes les ondes électromagnétiques.

D'une manière simple retenons que la fréquence du son reçu est une fonction de la vitesse de l'observateur et de l'émetteur.

4.6.3 Applications

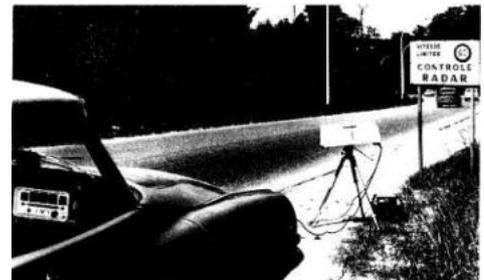
L'effet Doppler est souvent utilisé pour détecter des objets en mouvement, et parfois même pour mesurer la vitesse de ces objets. Dans ces applications, l'objet en question n'est pas un émetteur, mais il réfléchit les ondes émises par une source. Si l'objet est en mouvement par rapport à la source, la fréquence des ondes réfléchies est modifiée.

Système d'alarme

Certains systèmes d'alarme fonctionnent de cette manière. L'émetteur produit des ondes dans toute la pièce. Un récepteur capte les ondes réfléchies par les murs et tous les objets situés dans la pièce. Aussi longtemps que tout est au repos, le récepteur détecte des ondes de même fréquence que celles émises par l'émetteur. Par contre, lorsqu'un corps est en mouvement (animal, voleur, feuille qui tombe d'une plante, ...), les ondes réfléchies ont une fréquence différente, ce qui fait réagir le système d'alarme.

Mesure de la vitesse d'une automobile

Les policiers utilisent un radar qui émet des ondes électromagnétiques qui vont se réfléchir sur la voiture. La fréquence des ondes réfléchies va dépendre de la vitesse de la voiture; plus précisément, on peut établir que le changement de fréquence (différence entre la fréquence de l'onde émise et celle de l'onde réfléchie) est proportionnel à la vitesse du véhicule. En mesurant le changement de fréquence, on peut ainsi connaître la vitesse du véhicule.



Le cinémomètre. Cet appareil comporte un émetteur fixe qui envoie une onde connue vers la voiture. L'onde réfléchie sur celle-ci est analysée par un récepteur et permet de connaître la vitesse du véhicule avec une bonne précision.

Mesure de la vitesse du sang dans une artère

Dans ce cas, les ondes utilisées sont des ultrasons. Il s'agit donc d'un cas particulier d'échographie, appelé échographie Doppler.

Les ondes sont envoyées presque parallèlement à une artère, par exemple l'aorte à la sortie du cœur. Elles sont réfléchies par les globules rouges en mouvement avec le sang. Les ondes réfléchies ont donc une fréquence modifiée, et la mesure de cette modification permet de connaître la vitesse du sang. Ceci donne des indications sur la pression sanguine, sur l'état de l'artère (éventuellement partiellement obstruée), etc.

Astronomie (voir ondes lumineuses)

Les corps célestes émettent vers la Terre de la lumière qui peut être décomposée et analysée. (grâce à des spectres)

En l'analysant et en la comparant avec des spectres connus, on s'est aperçu que les raies de couleurs émises par les galaxies sont décalées vers le rouge.

L'effet Doppler permet de comprendre ce phénomène.

Si l'étoile s'éloigne de nous, les fréquences des ondes lumineuses émises par celle-ci sont plus petites et nous observons un spectre décalé vers le rouge

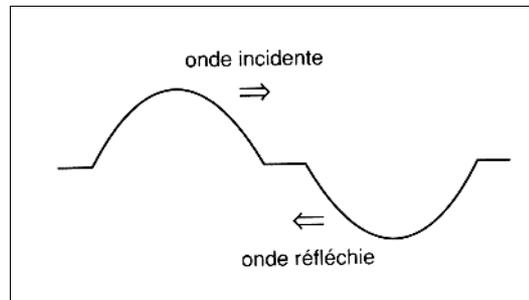
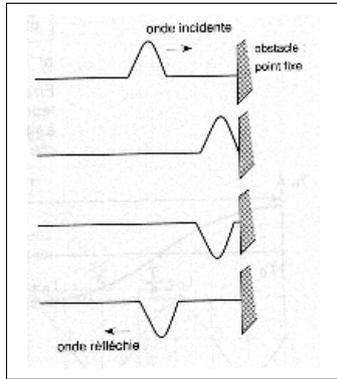
Si l'étoile se rapproche de nous, les fréquences sont plus grandes et le spectre se décale vers le bleu.

En mesurant le décalage des raies, on peut trouver la vitesse d'éloignement des astres

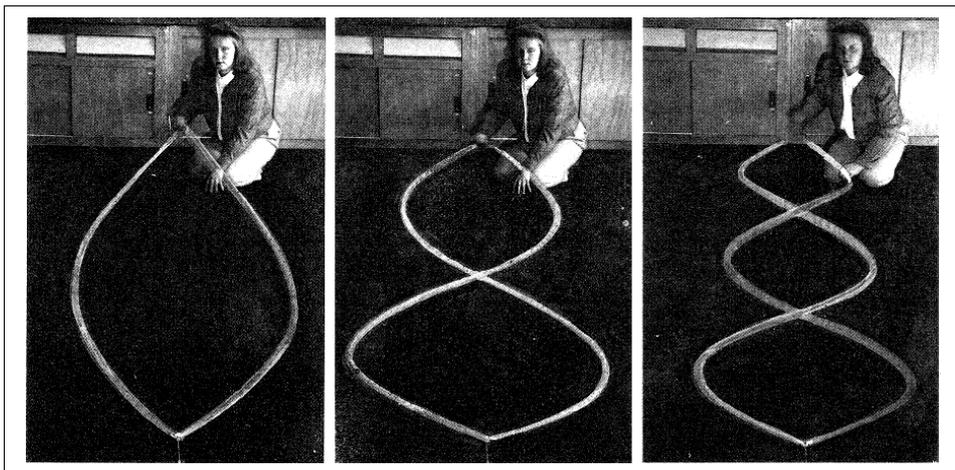
4.7 Les ondes stationnaires

4.7.1 Expérience

A l'extrémité d'une corde tendue ou d'un ressort, produisons un ensemble d'ondes [*ondes incidentes*]. Arrivées au bout de la corde, elles se réfléchissent et repartent en sens inverse et ce en changeant de signe [*ondes réfléchies*]



La corde est donc soumise en continu à des ondes incidentes venant de gauche et à des ondes réfléchies venant de droite.



On observe un phénomène appelé : ondes stationnaires. Dans ce type de phénomène : Certains points ne bougent pas : ce sont des nœuds de vibration.

Ces points sont des points pour lesquels les 2 ondes arrivent constamment en opposition

(voir schéma feuille suivante)

D'autres vibrent très fort : ce sont des ventres de vibration.

Ces points sont des points pour lesquels les 2 ondes arrivent constamment en phase.

La portion entre 2 nœuds est appelée fuseau.

Suivant la fréquence des vibrations initiales, on peut observer 1, 2, 3 (ou plus) fuseaux.

On peut montrer que la distance qui sépare deux nœuds ou 2 ventres est $\lambda / 2$ et que la distance qui sépare un nœud, d'un ventre est $\lambda / 4$.

En certains points, la somme de ces 2 ondes donne le repos.

Le point de la corde qui ne bouge pas est un nœud

4.8 Les interférences

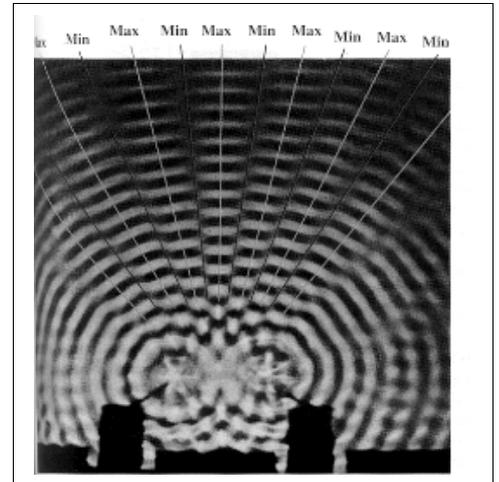
Comment deux ondes de même fréquence provenant de 2 sources différentes se superposent-elles en un point de l'espace ?

4.8.1 Expérience et conclusions

Deux points S_1 et S_2 s'enfoncent au même rythme dans la cuve à ondes.

On observe des couloirs limités par des lignes incurvées sur les quelles l'eau est immobile. Elles forment des lignes de nœuds ou des lignes nodales. (= minima de vibration)

Au milieu de ces couloirs, les points vibrent très fort et ils forment des lignes de ventres ou lignes ventrales. (= maxima de vibration)



La superposition de 2 ondes de même fréquence est appelée interférence. Ce phénomène engendre dans l'espace des points immobiles et des points vibrant au maximum.

Ainsi la superposition

- *de deux mouvements peut donner le repos*
- *de deux sons peut donner le silence*
- *de deux lumières peut donner l'obscurité* (voir module lumière)

Les phénomènes d'interférence sont très importants car ils prouvent le caractère ondulatoire des sources et ils permettent de mesurer la longueur d'onde ainsi que la fréquence des ondes.

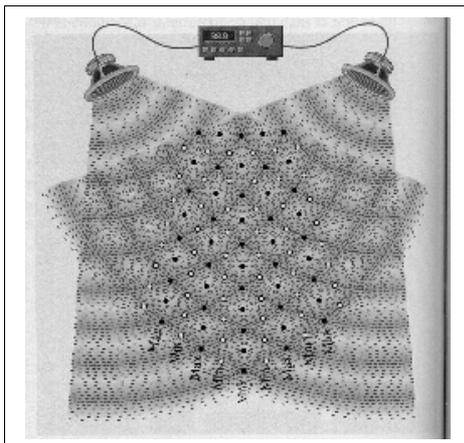


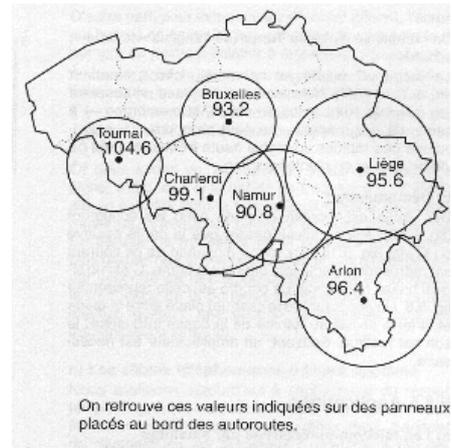
Figure 13.35 Interférence de deux ondes sonores. Là où une crête (région foncée) d'une onde se superpose à une crête de l'autre, il y a renforcement de l'onde (•). Là où un creux d'une onde se superpose à une crête de l'autre, il y a annulation de l'onde (o).

4.8.3 Exemple d'application

Pour une radio émettant en FM, les ondes émises se propagent en ligne droite.

La portée des émetteurs est donc faible et pour couvrir tout un pays, il faut un ensemble d’antennes qui amplifient et réémettent le signal de départ.

Afin d’éviter les perturbations dues aux phénomènes d’interférences entre deux ondes de même fréquence, les émetteurs « locaux » doivent émettre avec une fréquence différente. C’est ainsi que lors de la traversée de la Wallonie, si vous écoutez « Radio 21 », vous devrez changer de fréquence 4 ou 5 fois suivant la zone traversée.

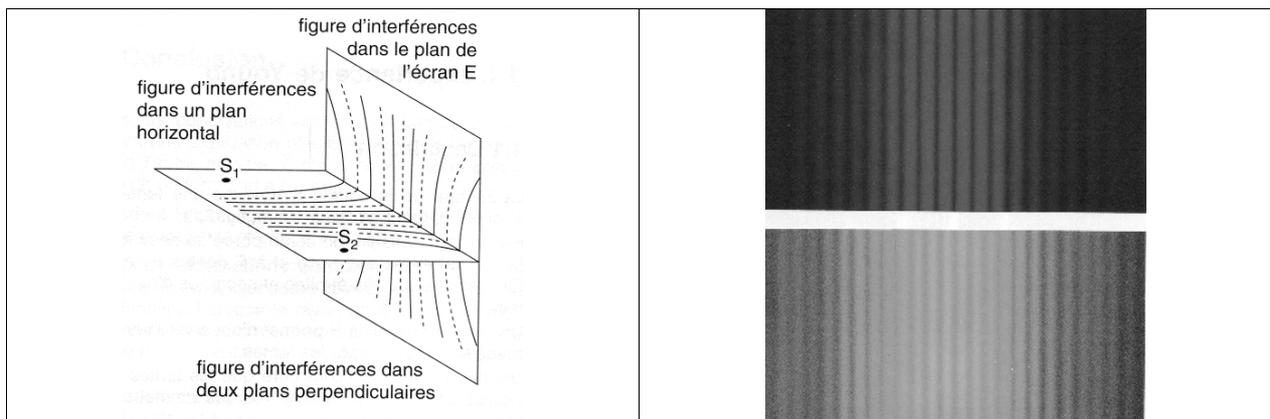


5. Nature ondulatoire de la lumière

5.1 Interférences lumineuses (Expériences de Young)

La lumière de la source S traverse une double fente. Celle-ci se comporte alors comme deux sources lumineuses S_1 et S_2 .

Regardons ce qui se passe dans le champs d’interférence, là où les deux ondes lumineuses se superposent sur un écran placé en ce point.

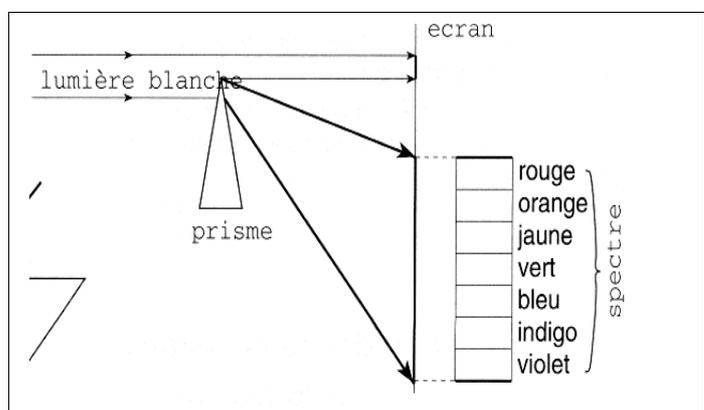


Sur cet écran, on observe alternativement : *des lignes où la lumière est maximale et des lignes où la lumière est nulle. Ce qui veut dire que lumière + lumière = obscurité*

Cette expérience montre que la lumière est une onde. On dit que la lumière a un caractère ondulatoire.

Elle doit être caractérisée dès lors par une fréquence, une longueur d’onde et une vitesse.

5.2 Dispersion de la lumière par un prisme



Nous avons déjà tous remarqué que lorsque nous regardons de la lumière à travers un morceau de verre, il apparaît différentes couleurs.

Envoyons de la lumière issue d'une lampe normale sur un prisme (= milieu homogène et transparent limité par 2 faces planes non //). Cette lumière qui nous semble blanche est appelée lumière blanche.

Derrière le prisme, nous obtenons un étalement de couleurs différentes appelé *spectre*. Le spectre est composé des couleurs de l'arc-en-ciel. On y distingue les couleurs suivantes: *rouge , orange , jaune , vert , bleu , indigo , violet*.

L'expérience met en évidence que la lumière blanche est composée de rayons de différentes couleurs. Le prisme permet de les séparer car en fait le rouge ne se réfracte pas aussi fort que le violet.

On appelle cela *la dispersion de la lumière par un prisme*.

La lumière d'une seule couleur est dite : lumière *monochromatique*

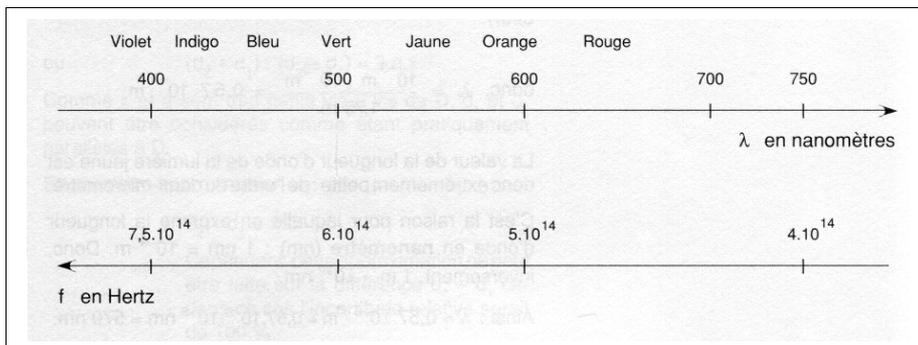
La lumière blanche étant un mélange des différentes couleurs est dite : lumière *polychromatique*

Chaque couleur est caractérisée par une longueur d'onde et une fréquence.

Le spectre visible s'étale

de 400 nm (= 0,4 10⁻⁶m) pour le violet

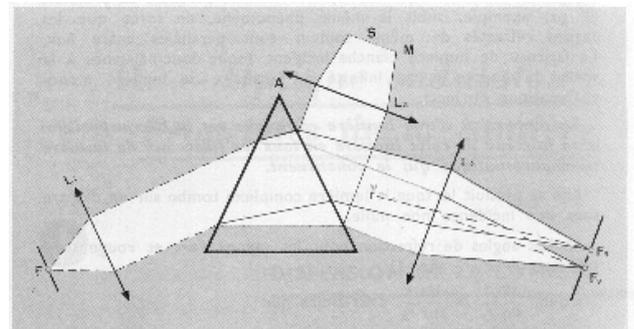
à 800 nm (= 0,8.10⁻⁶ m) pour le rouge



5.3 Identification d'une source lumineuse ; spectre de raies

5.3.1 Le spectroscopie

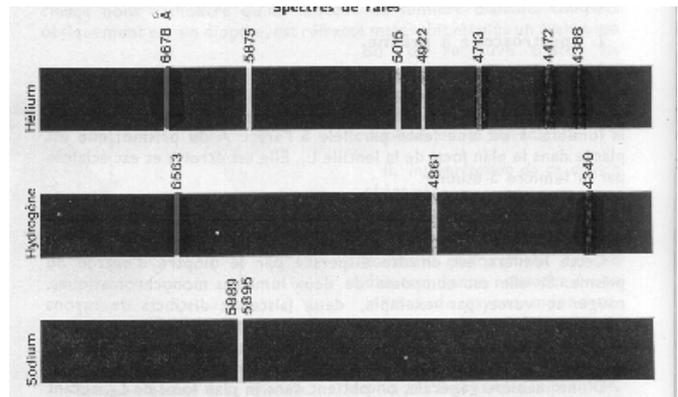
Le spectroscopie est un appareil qui permet d'analyser la lumière d'une source. Il est constitué d'un prisme dont le but est de décomposer la lumière de la source à étudier en ses différents rayons.



5.3.2 Spectre de raies

Si on regarde le spectre de raies produit par la lumière émise par une lampe à vapeur de sodium ou une lampe à vapeur de mercure, on obtient des spectres différents. En fait le spectre dépendra du métal contenu dans la vapeur de l'ampoule.

On obtient ainsi une véritable carte d'identité de la source lumineuse par une étude spectroscopique. Chaque source a son propre spectre.



6. Les ondes électromagnétiques

6.1 Rappel : les ondes mécaniques ou matérielles

Elles sont engendrées par des mouvements vibratoires dans la matière.

Elles ont besoin pour se propager d'un milieu élastique et ne se propagent donc pas dans le vide.

La vitesse de propagation diffère selon les milieux.

Les ondes acoustiques sont des ondes dues à des variations de pression du milieu.

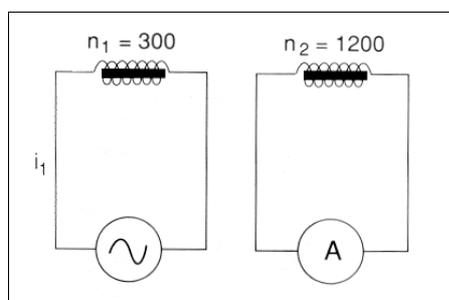
Les fréquences des sons audibles sont comprises entre 16 Hz et 16000 Hz.

Au-delà de 16000 Hz, on a les ultrasons, en dessous on a les infrasons. (voir chapitre « Son »)

Les ondes électromagnétiques sont d'une nature très différente des ondes matérielles.

6.2 Expériences

6.2.1 Emetteur - récepteur

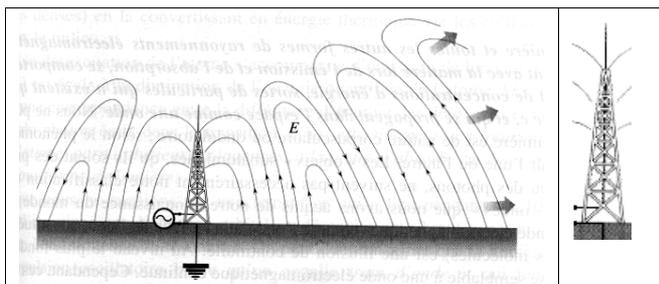


On alimente une bobine (= émetteur) en courant alternatif. Une seconde bobine placée au voisinage de la première est alors parcourue par un courant décelé grâce à un ampèremètre.

De l'énergie se propage donc de l'émetteur vers le récepteur.

C'est une onde transportant de l'énergie appelée onde électromagnétique.

6.2.2 Antennes (émetteur-récepteur)



Création d'une onde EM

Lorsqu'on envoie dans un circuit un courant alternatif dans un circuit, les électrons oscillent dans ce circuit (= antenne émettrice) et une partie de leur énergie est transformée en radiation électromagnétique. Une des caractéristiques de ces radiations est la

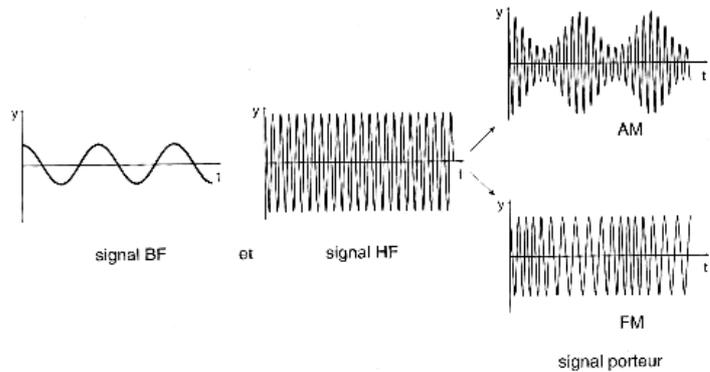
fréquence f (nombre d'oscillations par seconde) exprimée en hertz. (Hz)

Le signal acoustique qu'on veut transmettre (parole, musique) produit au départ des différentes stations émettrices doit d'abord être transformé en signal électrique par l'intermédiaire d'un micro.

Pour distinguer les différents émetteurs, un signal haute fréquence appelé **signal porteur** est modulé par le signal à envoyer (signal basse fréquence).

Chaque émetteur se distingue par sa fréquence d'émission (ex: 621 kHz pour la première chaîne radio de la RTBF).

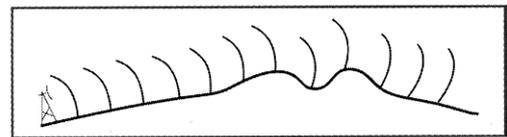
La modulation consiste à modifier un paramètre du signal porteur, par exemple l'amplitude ou la fréquence.



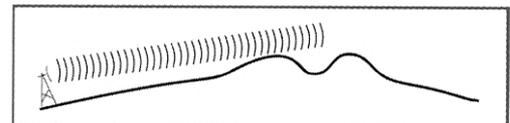
En modulation d'amplitude ou AM c'est l'amplitude du signal porteur qui varie.

En modulation de fréquence ou FM, c'est la fréquence du signal qui varie.

La propagation des ondes électromagnétiques dépend de leur longueur d'onde (voir : diffraction des ondes). Les grandes ondes (*France Inter, Europe 1, RTL,...*) sont facilement diffractées par le relief des immeubles. Elles suivent la courbure de la terre et sont reçues à grande distance. Elles peuvent être reçues au fond d'une vallée car leur longueur d'onde est bien supérieure aux obstacles.



Par contre, les ondes courtes (ex: bande FM de 88 MHz à 108 MHz) se propagent en ligne droite. Ces ondes ne suivent pas la courbure de la terre et leur portée est limitée. Elles sont difficilement reçues au fond des vallées (fig. 5.47) puisque des obstacles, comme des collines de 100 m de haut, sont beaucoup plus grands que leur longueur d'onde. Il n'y a alors pas de diffraction mais la propagation reste rectiligne.



Afin de pouvoir entendre une même station émettrice, il faudra donc un réseau d'antennes qui amplifient et qui ré-émettent le signal de départ à des fréquences différentes afin d'éviter des interférences.

La carte mentionne la portée des émetteurs et la fréquence en mégahertz (Voir carte page 18)

6.3.2 Les ondes TV

Sûrement observées lors de la sélection des stations TV sur le téléviseur, on a :

VHF (Very high frequencies)

UHF (ultra high frequencies)

Le principe est le même que pour les ondes radio mais en plus ici il faut transporter les informations relatives à l'image (10 millions d'informations par seconde) et la fréquence des ondes sera plus élevée.

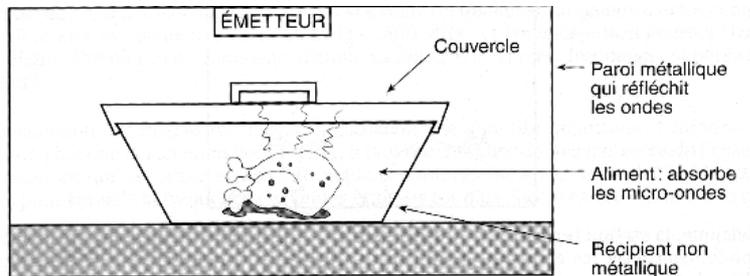
6.3.3 Les ondes radar

Ces ondes se propagent en ligne droite et se réfléchissent bien sur les objets. Elles sont dès lors utilisées pour la détection et le repérage.

Lorsque l'objet est plus grand que la longueur d'onde utilisée, il y a peu de diffraction et les ondes sont presque entièrement réfléchies.

6.3.4 Les micro-ondes

Des ondes de cette fréquence ($f = 2,45\text{GHz}$) possèdent la propriété de provoquer la rotation et la vibration des molécules d'eau.



6.3.5 L'infrarouge

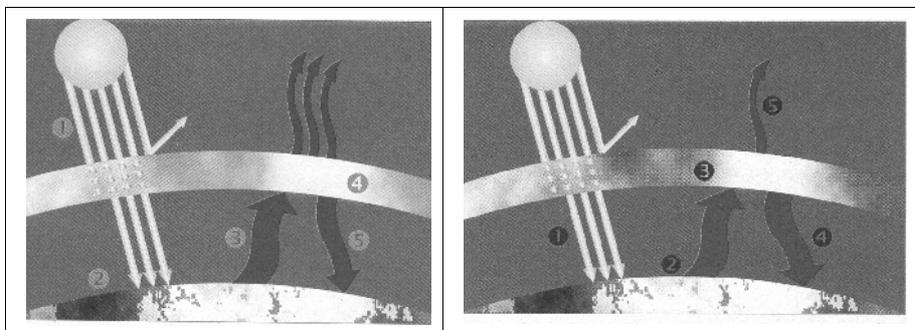
Ce sont des ondes émises essentiellement par les corps chauds c'est à dire les corps dont les molécules sont en agitation thermique. (radiateur, plaque de cuisson, le corps humain, Soleil...) Ces rayons sont capables d'impressionner des plaques photographiques spéciales permettant ainsi de faire des photos ou des films dans l'obscurité.

Les corps qui absorbent les IR voit leur température augmenter.

On les utilise pour le chauffage, la cuisson, séchage de peinture mais aussi pour le réchauffement d'un muscle (thermothérapie).

Les IR sont utilisés aussi dans des prospections géologiques, l'étude des déperditions calorifiques, les télécommandes

6.3.5.1 L'effet de serre



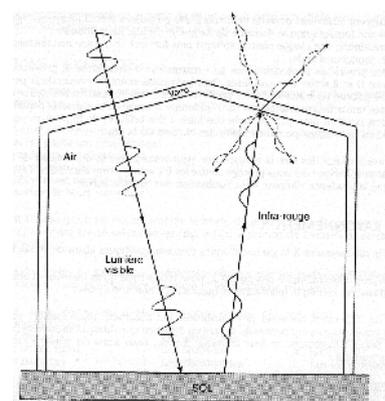
Lorsque la lumière solaire atteint le sol, elle y est absorbée partiellement ce qui provoque un échauffement. Comme tout objet chaud, le sol devient ainsi émetteur de rayonnement infra-

rouge. Cette émission IR tend à limiter l'élévation de la température du sol et, la nuit, cette même émission IR fera perdre au sol une grande partie de la chaleur causant parfois de célèbres gelées au ras du sol.

Importance des gaz à effet de serre se trouvant dans l'atmosphère.

Dans le deuxième cas, les gaz sont plus importants que dans le premier. Conséquence, les infrarouges provenant du sol sont plus efficacement renvoyés vers la terre et ceci réduit l'émission de chaleur vers l'espace.

Les serres de jardin exploitent le fait que le verre des vitres est transparent à la lumière visible mais absorbe les rayons IR. De la sorte, les rayons IR émis par le sol sont captés par les vitres. Le



verre les absorbe et les ré-émet dans toutes les directions . Une partie de cette émission par le verre est dirigée vers le bas et contribue à maintenir chaud le sol de la serre. Ceci s'appelle l'effet de serre.

6.3.6 La lumière visible (rouge au violet)

Voir « La dispersion de la lumière »

6.3.7 L'ultraviolet UV

Ils sont produits naturellement par le Soleil

Ces rayons manifestent des propriétés spécifiques suivant leur fréquence.

Suivant leur énergie, on distingue les UVA, UVB, UVC

Les UVC (comme les X et les γ) sont arrêtés par la couche d'ozone située à une trentaine de kilomètres d'altitude. Ces rayons sont extrêmement dangereux.

Les UVA et B exercent une action physiologique sur l'épiderme car ils produisent au contact de la peau de la vitamine D. Mais ils ont aussi un effet néfaste sur le corps.

Les UVA traversent le derme et accélèrent le vieillissement de la peau en provoquant des rides.

Ils sont responsables des cancers de la peau

Les UVB atteignent l'épiderme et sont responsables du bronzage et des coups de Soleil.

En effet, à la base de l'épiderme, on a des cellules, « les mélanocytes » dont le rôle est de produire des grains : « la mélanine ». Celle-ci est produite en grande quantité sous l'action du Soleil. Ils migrent alors vers la surface de la peau pour la protéger en absorbant les UVB et de ce fait il colore la peau. En fait, la mélanine contient des grains noirs et rouges. Une peau mate contient plus de noirs que de rouges. Les noirs migrent vers la surface de la peau pour la protéger et la colorer. Une peau claire contient plus de rouges que de noirs. Les rouges ne remontent pas en surface, protègent moins bien et colorent donc moins la peau.

Attention, toutes les peaux doivent être protégées car si la mélanine absorbe les UVB, ils laissent passer les UVA d'où l'emploi de crèmes solaires pour s'en protéger.

Il faut aussi savoir que les 80 % de UV traversent les nuages mais ils pénètrent aussi dans l'eau (à 1mètre de profondeur). Par contre, le verre absorbe une grande partie des UV. On perd donc son temps à essayer de bronzer derrière une fenêtre.

La quantité d'UV reçue sur la Terre n'est pas la même partout. En montagne (moins d'atmosphère), on en reçoit plus. De même à l'équateur (Soleil est toujours à la verticale)

Certains UV ont une action germicide c'est à dire qu'ils peuvent tuer les micro-organismes. Cette propriété est utilisée dans la stérilisation.

Ils participent à la photosynthèse

6.3.7 Les rayons X

Découverts par Röntgen en 1895.

Les X peuvent traverser des substances et impressionner des plaques photo (radiographie)

L'absorption des X par une matière est d'autant plus grande que l'épaisseur traversée est grande mais l'absorption dépend aussi de la nature du milieu traversé. Ainsi les X sont arrêtés par du plomb (tablier en plomb utilisé en médecine nucléaire)

Ainsi les os humain sont plus absorbant que les tissus qui les entourent. Donc il en résulte sur une plaque photo, une image des os à l'intérieur du corps

Un scanner est un appareil à rayons X mais dont l'image est construite en faisant tourner la source de rayons X d'un angle de 360° autour de l'organe à étudier.

En radiothérapie, les X sont utilisés en médecine pour détruire les cellules cancéreuses.

Dans les expertises, l'analyse des produits utilisés dans la peinture permet de déceler les faux. Les X sont très utilisés pour l'analyse des tableaux car ils révèlent tout ce qu'une toile renferme entre autre, le style et la technique d'un artiste ainsi que toutes les modifications apportées à l'œuvre originale.

6.3.8 Les rayons γ (gamma)

Ces rayons extrêmement énergétiques et donc dangereux seront analysés dans la partie « Nucléaire » ; Ils sont produits par la désintégration de certains éléments radioactifs.