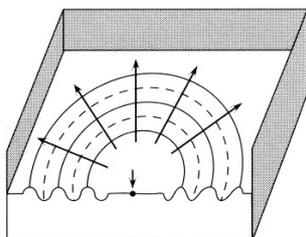


# Propriétés des ondes

## 1. Propagation sans obstacle



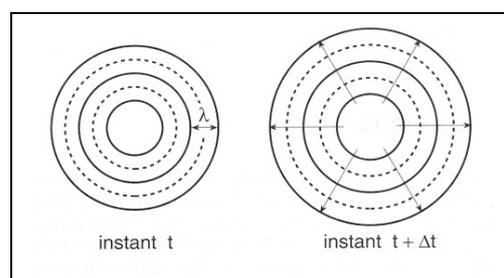
Les propriétés des ondes seront étudiées avec des ondes à la surface de l'eau et ce dans une cuve à ondes. Un vibreur crée des perturbations entretenues à la surface et les ondes générées sont visualisées par projection. Suivant la forme du vibreur, on créera des ondes planes ou des ondes circulaires.

### Onde circulaire

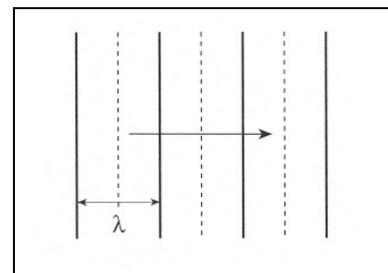
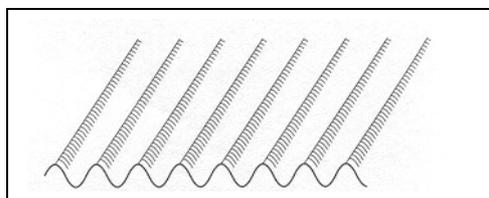
Les traits pleins représentent les sommets et les traits en pointillés représentent les creux de « la vague ».

*Deux traits pleins sont séparés par une longueur d'onde  $\lambda$*

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



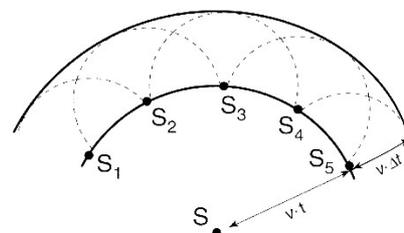
### Onde plane



*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.*

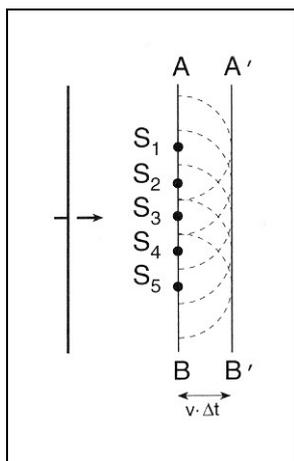
### 1.1 PRINCIPE DE HUYGENS

Le point S où la goutte vient de tomber a été dérangé de sa position d'équilibre et cette perturbation se communique de proche en proche aux autres points de la surface : S est une source d'ondes circulaires.



Huygens généralise cette propriété à tout point écarté de sa position d'équilibre.

*Tout point atteint par l'onde se comporte comme une source d'ondes, c'est à dire que ce point génère de ondes élémentaires circulaires de même fréquence.*



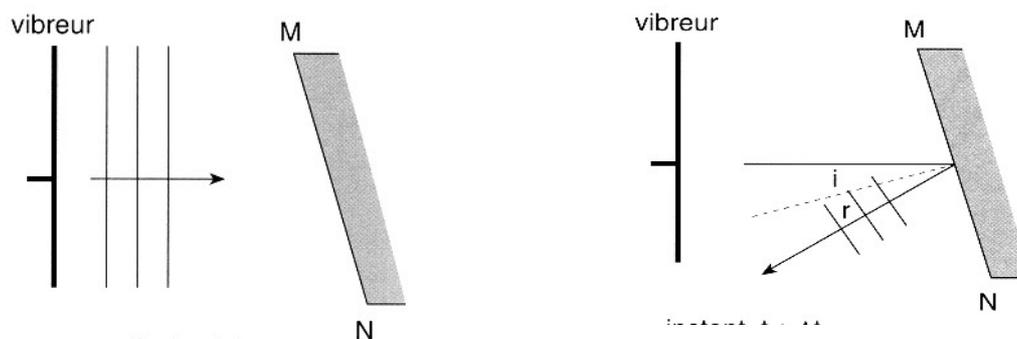
Ainsi, la perturbation partie de  $S$  à l'instant  $t = 0$ , atteint, à l'instant  $t$ , tous les points de la circonférence de rayon  $v.t$ ; chacun de ces points, par exemple  $S_1, S_2, S_3, \dots$  émet des ondes élémentaires circulaires qui, à l'instant  $t + \Delta t$ , ont parcouru la distance  $v.\Delta t$ . Ces ondes élémentaires ne sont pas visibles; mais leur enveloppe extérieure forme la ligne circulaire de rayon  $v.t + v.\Delta t = v.(t + \Delta t)$ : à l'instant  $t + \Delta t$ , la perturbation partie de  $S$  a atteint la circonférence de rayon  $v.(t + \Delta t)$ . Le principe de Huygens permet donc de prévoir qu'une onde circulaire va se propager en restant une onde circulaire.

De même pour une onde plane: soit à l'instant  $t$  une perturbation formant le segment  $AB$  (fig. 4.6). Chacun des points  $S_1, S_2, S_3, \dots$  de ce segment émet des ondes élémentaires circulaires, qui, à l'instant  $t + \Delta t$ , ont parcouru la distance  $v.\Delta t$  depuis l'instant  $t$ . Leur enveloppe extérieure forme un segment  $A'B'$  distant de  $v.\Delta t$  du segment  $AB$ . Le principe de Huygens permet donc de prévoir qu'une onde plane se propage en restant une onde plane.

## 2. Réflexion des ondes

### 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.

### 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  $\lambda$ , 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 réfléchi) sont égaux.

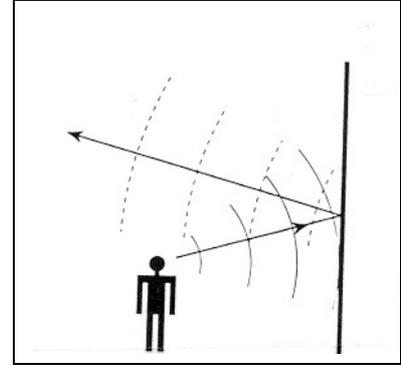
## 2.3 APPLICATIONS

Rappelons que toutes les propriétés étudiées avec la cuve à ondes, sont également d'application avec toutes les autres types d'ondes.

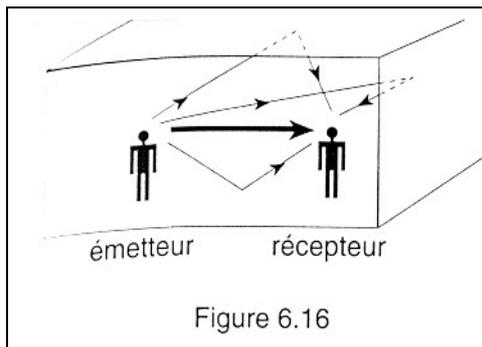
( Rappel :  $V_{\text{son}} = 340 \text{ m/s}$  à  $15^\circ\text{C}$  )

### 2.3.1 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).



### 2.3.2 Réflexion 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



### 2.3.3 Le sonar

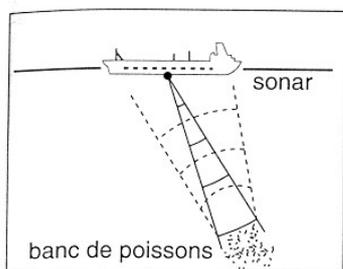


Figure 6.17

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 réfléchiée 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.

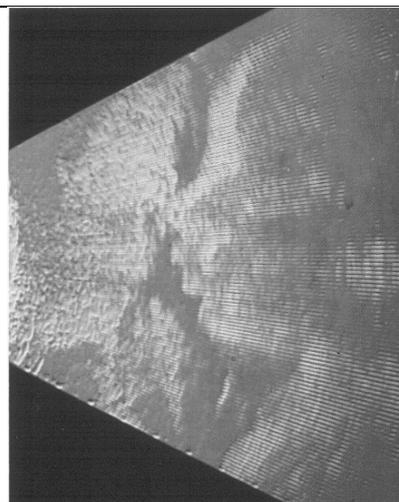
### 2.3.4 L'échographie

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

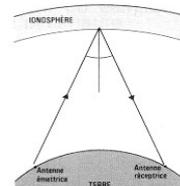
L'émetteur-récepteur d'ultrasons est placé en contact étroit avec la peau et chaque fois que le faisceau ultrasonique rencontre sur le parcours tissulaire une structure différente, il se réfléchit partiellement.

Les échos sont alors transformés en énergie électrique et visualisés sur un écran.



Toutes les ondes se réfléchissent, même les ondes radio (voir ondes 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.

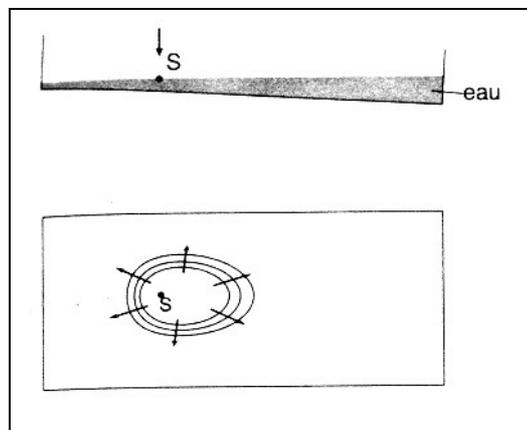
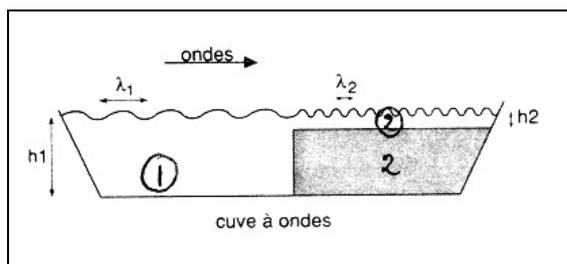


**Le cinémomètre.** Cet appareil comporte un émetteur fixe qui envoie une onde connue vers la voiture. L'onde réfléchiée sur celle-ci est analysée par un récepteur et permet de connaître la vitesse du véhicule avec une bonne précision.

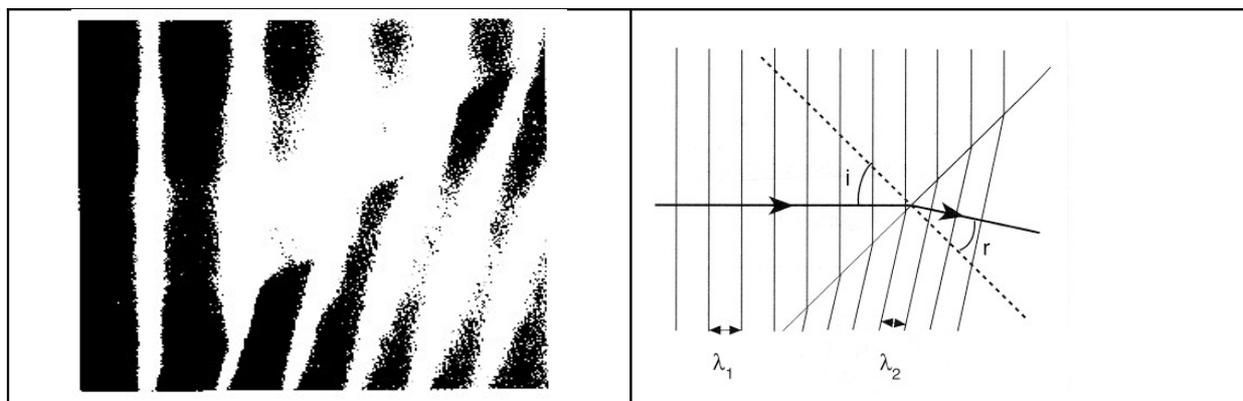
### 3. Réfraction des ondes

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.

#### 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  $h_1 > h_2$  ).



#### 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  $\lambda_1 < \lambda_2$

### 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.

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).

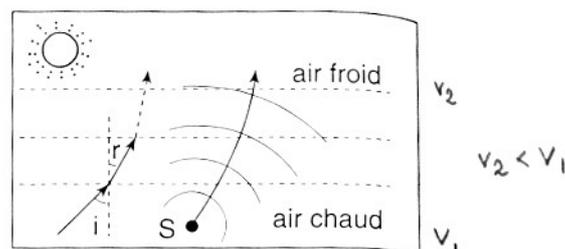


Figure 6.26

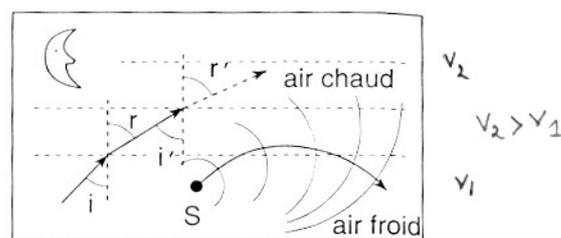


Figure 6.27

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 situé sur la terre.

### 3.4 COMPLÉMENTS SUR LA RÉFLEXION ET LA RÉFRACTION

L'hypothèse d'Huygens est parfaite pour expliquer les phénomènes typiquement ondulatoires (ex : diffraction). Cependant, si on admet que la lumière est une onde, et que l'on abandonne les hypothèses de l'optique géométrique, alors il faut montrer que l'on peut retrouver les lois de la réflexion et de la réfraction.

#### La réflexion

Considérons une onde plane  $p$  et soient  $I_1, I_2, I_3$  trois directions parallèles à la direction de propagation de l'onde.

Au moment où celle-ci atteint le point  $A$  du plan  $M$ , elle a progressé le long de  $I_2$  et  $I_2$  jusqu'en  $B$  et  $C$ .

Conformément au principe d'Huygens, la particule  $A$  devient un centre de vibrations.

Au bout de  $t$  secondes, temps que met l'onde pour aller de  $C$  en  $T$ , celle qui émane de  $A$  s'avance jusqu'à une sphère  $\sigma$ , de rayon :  $AR = TC = vt$ ,  $v$  mesurant la vitesse de l'onde

Lorsque la particule  $D$  est atteinte par l'onde,  $t'$  secondes après son passage en  $B$ , l'onde émanant de  $D$ , atteint au bout de  $(t - t')$  secondes, la sphère  $\sigma'$  de rayon :  $DS = v(t - t')$

Puisque les triangles  $ART$  et  $DST$  sont rectangle, il suffit de montrer que

$\frac{TA}{TD} = \frac{AR}{DS}$  pour prouver que les plans tangents  $TR$  et  $TS$  aux sphères  $\sigma$  et  $\sigma'$  sont confondus.

Et il en est bien ainsi puisque :

$$\frac{TA}{TD} = \frac{TC}{TE} = \frac{vt}{v(t-t')} = \frac{t}{t-t'} \quad \text{et} \quad \frac{AR}{DS} = \frac{vt}{v(t-t')} = \frac{t}{t-t'}$$

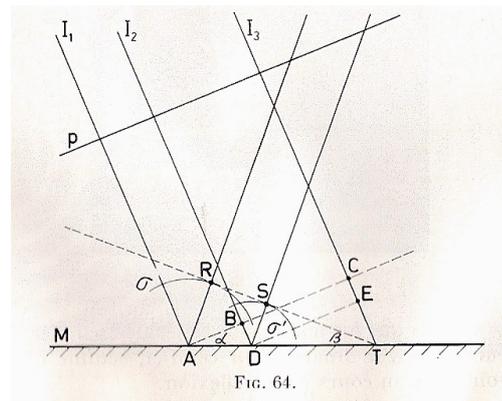
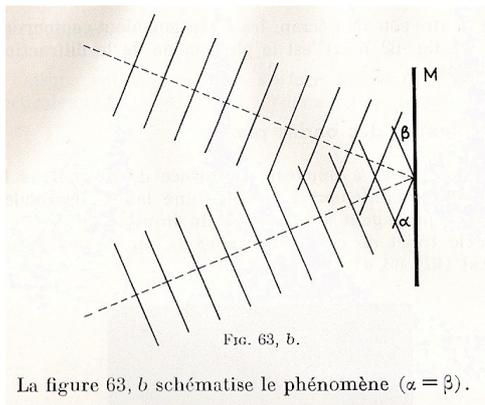
Après réflexion, l'onde plane est donc parallèle à  $TR$ . Sa direction de propagation est parallèle à  $AR$  ou  $DS$ .

C'est le phénomène de la réflexion des ondes.

De plus, les triangles  $CAT$  et  $RTA$  sont égaux; donc :  $\alpha = \beta$

Autrement dit, avant et après réflexion, l'onde plane présente donc la même inclinaison sur le plan.

→ **Les angles incidence et de réflexion sont égaux.**



## La réfraction

Considérons une onde plane  $p$  et soient  $I_1, I_2$  et  $I_3$ , trois directions de propagation de l'onde dans le milieu (1). Soient  $v_1$  et  $v_2$  les vitesses de l'onde respectivement dans les milieux (1) et (2).

Au moment où l'onde plane atteint le point  $A$  de la surface de séparation des deux milieux, elle a progressé le long de  $I_1$  et  $I_2$ , jusqu'en  $B$  et  $C$ .

Conformément au principe d'Huygens, la particule  $A$  devient un centre de vibrations.

Au bout de  $t$  secondes, temps que met l'onde pour aller de  $C$  en  $T$ , celle émanant de  $A$  s'avance jusqu'à une sphère  $\sigma$  de rayon  $AR = v_2 t$

Lorsque l'onde partant de  $B$  atteint la particule  $D$ ,  $t'$  secondes après son passage en  $B$ , l'onde qui émane de  $D$  atteint, au bout de  $(t - t')$  secondes, la sphère  $\sigma'$  de rayon  $DS = v_2(t - t')$

Puisque les triangles  $ART$  et  $DST$  sont rectangle, il suffit de montrer que  $\frac{TA}{TD} = \frac{AR}{DS}$

pour prouver que les plans tangents  $TR$  et  $TS$  aux sphères  $\sigma$  et  $\sigma'$  sont confondus.

Et il en est bien ainsi puisque :

$$\frac{TA}{TD} = \frac{TC}{TE} = \frac{v_1 t}{v_1(t - t')} = \frac{t}{t - t'} \quad \text{et} \quad \frac{AR}{DS} = \frac{v_2 t}{v_2(t - t')} = \frac{t}{t - t'}$$

Dans le milieu (2), l'onde réfractée est donc parallèle à la droite  $TR$ . La direction  $I_1$  prend dans le milieu (2), la direction  $R_1$ , perpendiculaire à l'onde plane et  $I_2$ , la direction  $R_2$  également perpendiculaire à l'onde plane.

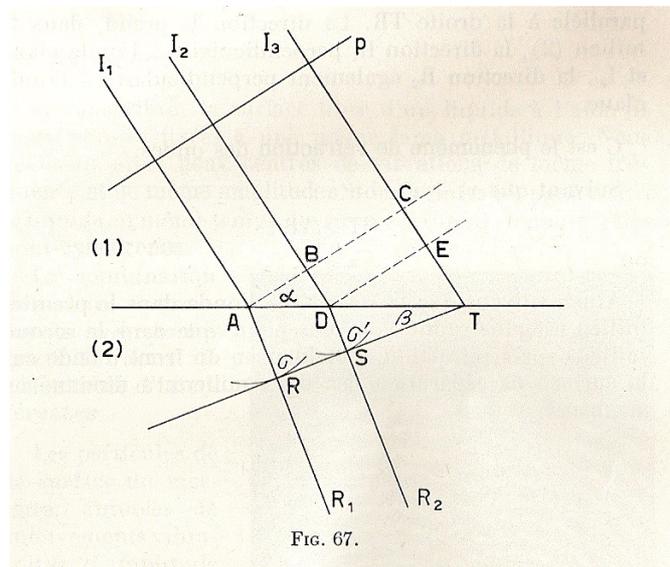
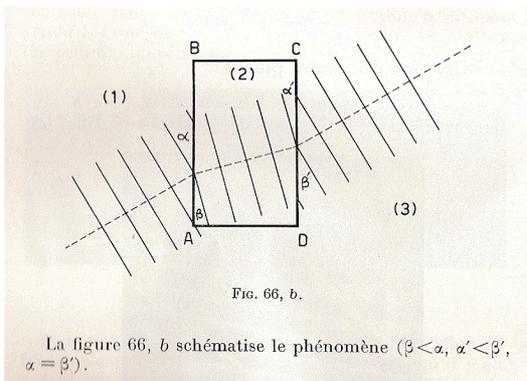
C'est le phénomène de réfraction des ondes.

De plus, on a 
$$\begin{cases} CT = v_1 t = AT \sin \alpha \rightarrow AT = \frac{v_1 t}{\sin \alpha} \\ AR = v_2 t = AT \sin \beta \rightarrow AT = \frac{v_2 t}{\sin \beta} \end{cases}$$

$$\rightarrow \frac{v_1 t}{\sin \alpha} = \frac{v_2 t}{\sin \beta} \rightarrow \sin \alpha = \frac{v_1}{v_2} \sin \beta \rightarrow \boxed{\sin \alpha = n_{12} \sin \beta}$$

Ce qui est la loi de Snell- Descartes pour la réfraction.

$n_{12}$  est l'indice de réfraction du milieu 1 par rapport au milieu 2



## 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 ?

### 4.1 EXPÉRIENCE

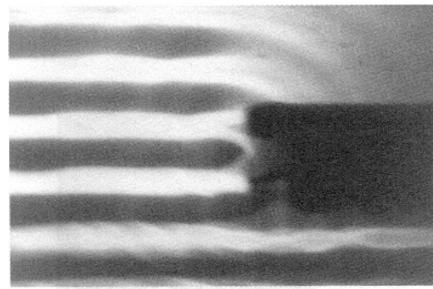
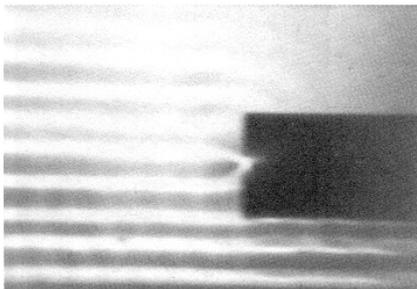
Sur les photos, les ondes se propagent du bas vers le haut.

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. Elles contournent ( plus ou moins ) les obstacles (objets, fenêtres,..). Elles ne se propagent plus en ligne droite.*

### 4.2 CONCLUSIONS

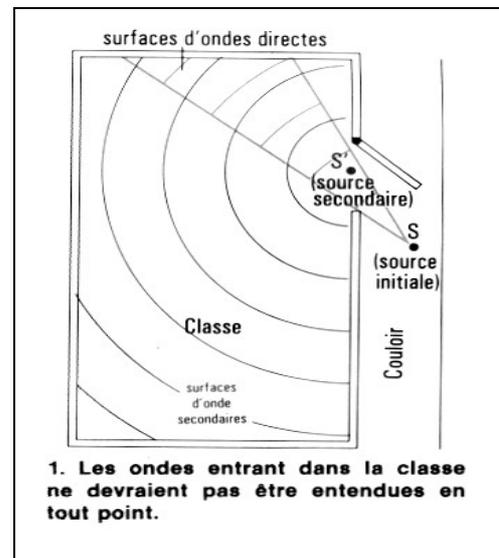
#### 4.2.1 Passage près d'un objet



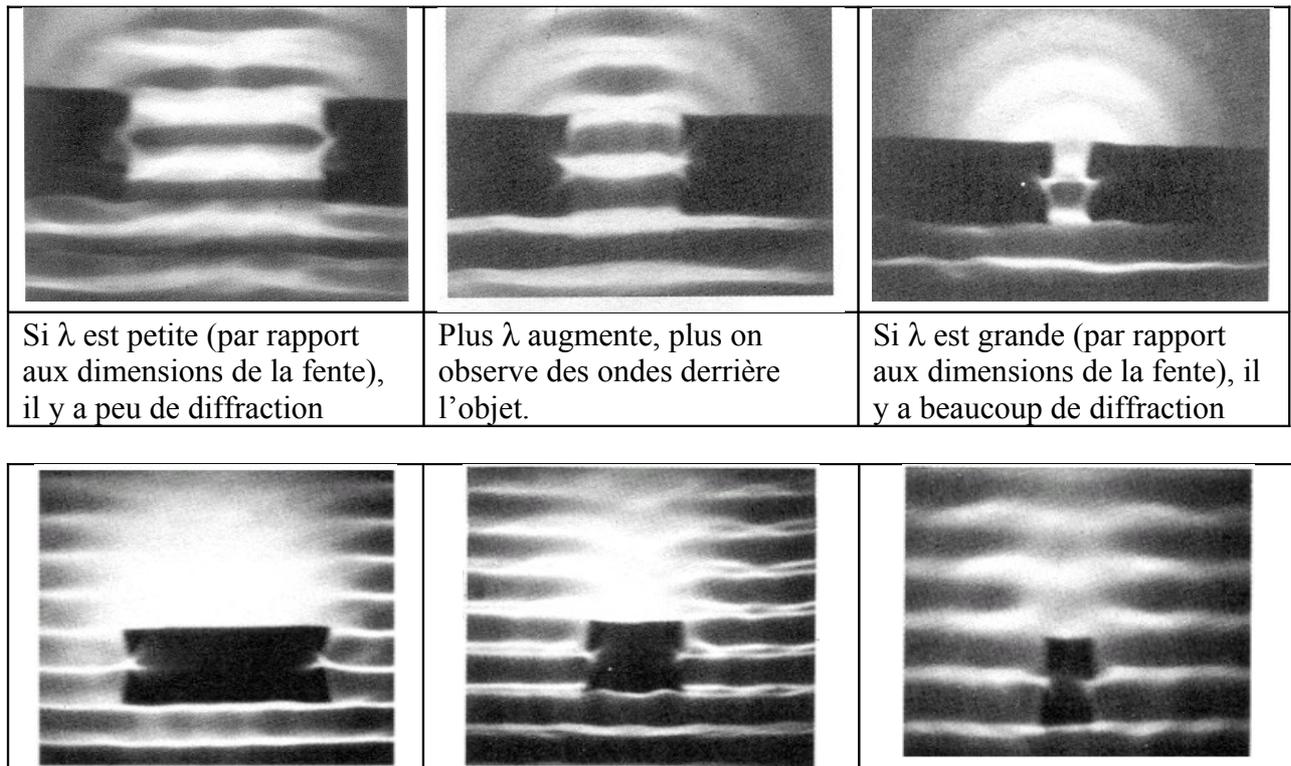
*La diffraction est un phénomène qui dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ .*

*En effet, elle apparaît fort peu lorsque  $\lambda$  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.*

*Lorsque  $\lambda$  est égale ou supérieure aux dimensions de l'objet, il y a beaucoup de diffraction derrière l'obstacle.*



## 4.2.2 Passage à travers une fente



Mêmes conclusions pour un obstacle entier

A noter ( 3eme cas), *lorsqu'il y a beaucoup de diffraction ( $\lambda$  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.*

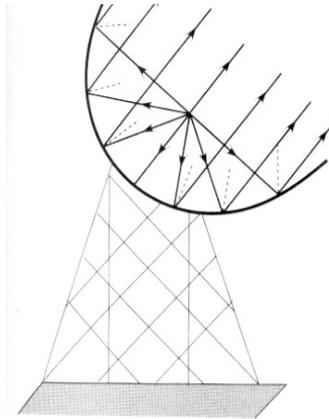
*A noter que le phénomène de diffraction est une propriété qui prouve la nature ondulatoire d'un phénomène.*

## 4.3 APPLICATIONS

### 4.3.1 Réception des ondes radio

	<p>Grâce à la diffraction, les ondes kilométriques (France Inter, RTL)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- suivent la courbure de la Terre et sont reçues à 1000 km de la source</li> <li>- peuvent être reçues au fond d'une vallée.</li> </ul> <p>En effet, la longueur d'onde est bien supérieure aux obstacles.</p>
	<p>Par contre, pour les ondes métriques (FM), décimétriques (TV), la visibilité optique directe est nécessaire entre antenne émettrice et récepteur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ces ondes ne suivent pas la courbure de la Terre</li> <li>- elles sont difficilement reçues au fond d'une vallée.</li> </ul> <p>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.</p>

### 4.3.2 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.

### 4.3.3 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.

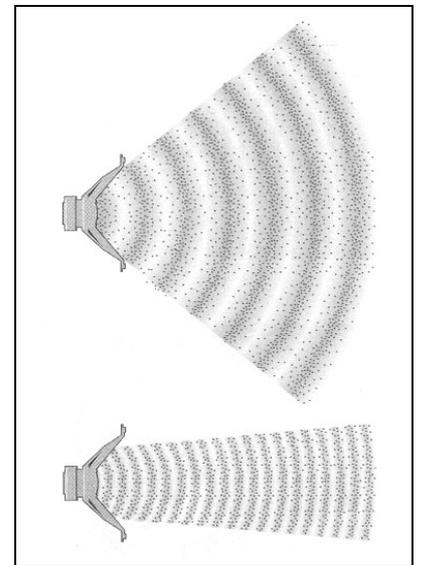
### 4.3.4 Dimensions d'un HP

Un HP se comporte comme une fente traversée par une onde.

Un HP de diamètre 0,15 m qui envoie une onde d'une fréquence de 1000 Hz. ( $\lambda = v/f = 3,4 \text{ m}$ ) est dans le cas où  $\lambda$  est grande devant les dimensions de l'obstacle, donc on a beaucoup de diffraction.

Par contre si  $f = 10.000 \text{ Hz}$  alors  $\lambda = 0,03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$  alors  $\lambda$  est « petite » devant les 15 cm du HP et l'onde file en ligne droite et il y a peu de diffraction pour ces ondes.

C'est pour cela que les HP de gros diamètres sont utilisés pour les sons graves et les HP de faibles diamètres, pour les sons aigus. Dans ces conditions, les HP « diffusent » les sons dans un cône assez ouvert et pas dans un cône restreint.



## 5. Effet Doppler

### 5.1 DÉFINITION

*Chaque sorte d'onde se propage dans un milieu homogène à vitesse constante, qui dépend uniquement des propriétés physiques du milieu. Cela est vrai quel que soit le mouvement de la source : elle émet l'onde qui se propage. Cependant, la perception de la fréquence d'une onde et de sa longueur d'onde peut être modifiée considérablement par un mouvement relatif entre l'observateur et la source.*

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. La fréquence ou la hauteur est plus élevée lorsque l'ambulance s'approche.

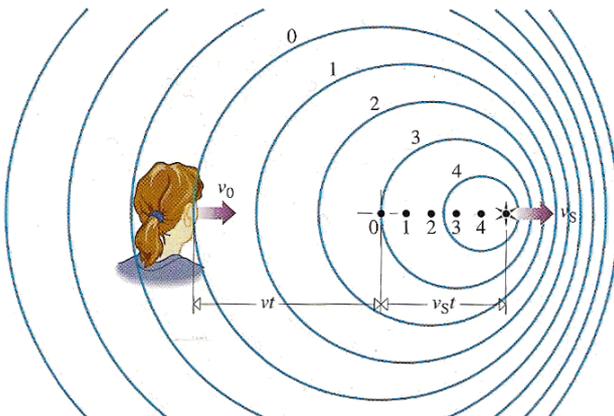
Cet effet fut découvert en 1842 par Christian Doppler à propos des ondes sonores et puis par Fizeau en 1848 à propos des ondes lumineuses.

**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 de l'observateur**

### 5.2 FORMULE

La fig 13.40. Montre cinq positions successives de la source et les fronts d'onde correspondants.



**Figure 13.40** La source à droite se déplace vers la gauche à une vitesse  $v_s$ , prise positive. L'observateur se déplace aussi vers la droite avec une vitesse  $v_o$ , qui est positive aussi.

Supposons qu'à l'instant  $t=0$  la source était au point 0. Si la vitesse de la source est  $v_s$ , à l'instant  $t$ , elle s'est déplacée d'une distance  $v_s t$ . Comme sa fréquence est  $f_s$ , le nombre d'ondes qu'elle a émises est  $f_s t$ .

En se propageant à la vitesse du son  $v$ , le front émis à l'instant  $t=0$  est une sphère de rayon  $vt$ , où il rencontre l'observateur.

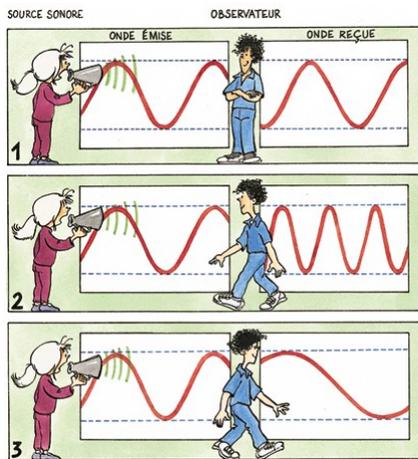
La longueur d'onde  $\lambda$  du côté de l'observateur est le quotient de la distance entre la source et l'observateur par le nombre d'onde

$$\lambda = \frac{vt + v_s t}{f_s t} = \frac{v + v_s}{f_s}.$$

L'observateur se déplace vers la droite à la vitesse  $v_0$ , et il reçoit les fronts

d'onde à une vitesse  $v + v_0$ . Par conséquent, il perçoit une fréquence :  $f_0 = \frac{v + v_0}{\lambda}$ .

En conclusion :  $f_0 = \frac{v + v_0}{v + v_s} f_s$



## Exemple

Une voiture roule à 20.0 m/s et émet un son de sirène de fréquence 600Hz. Déterminer la fréquence perçue par un observateur immobile pendant que la voiture s'approche et pendant qu'elle s'éloigne. Prendre la vitesse du son à 340 m/s

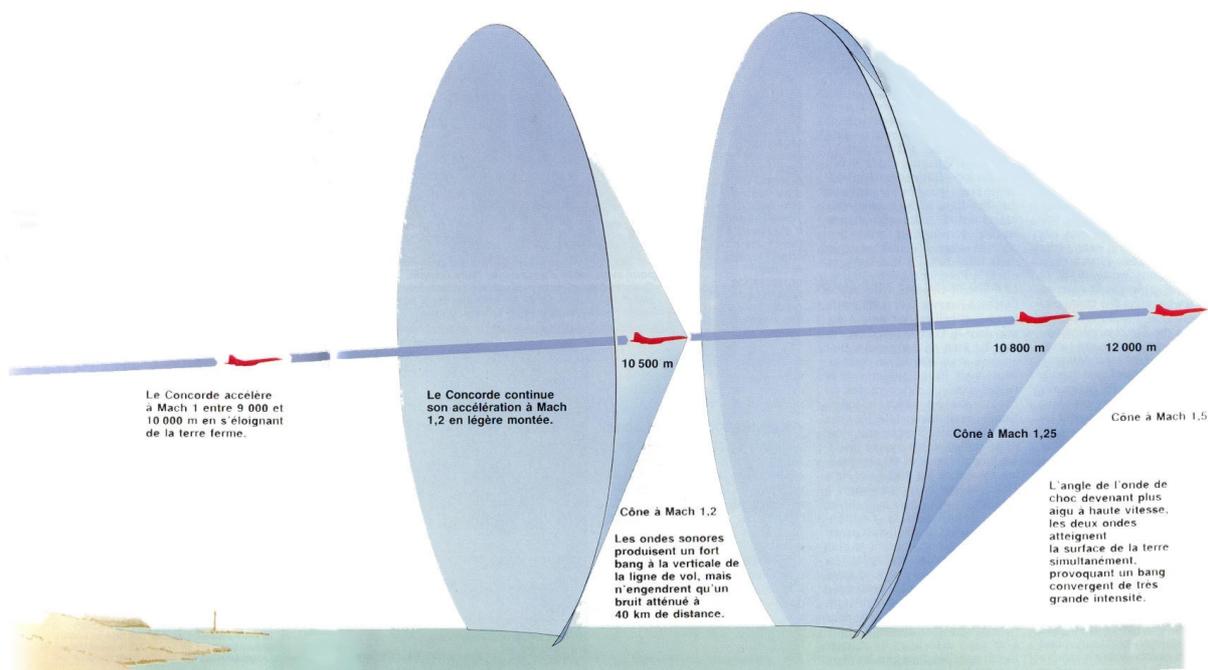
On a donc ici :  $v_0 = 0$ .

Lorsque la voiture s'approche  $v_s = -20$  m/s et quand elle s'éloigne  $v_s = +20$  m/s

D'où :

La voiture s'approche:  $f_0 = \frac{v f_s}{v + v_s} = \frac{340 \times 600}{340 + (-20)} = 638 \text{ Hz}$

La voiture s'éloigne :  $f_0 = \frac{v f_s}{v + v_s} = \frac{340 \times 600}{340 + 20} = 567 \text{ Hz}$



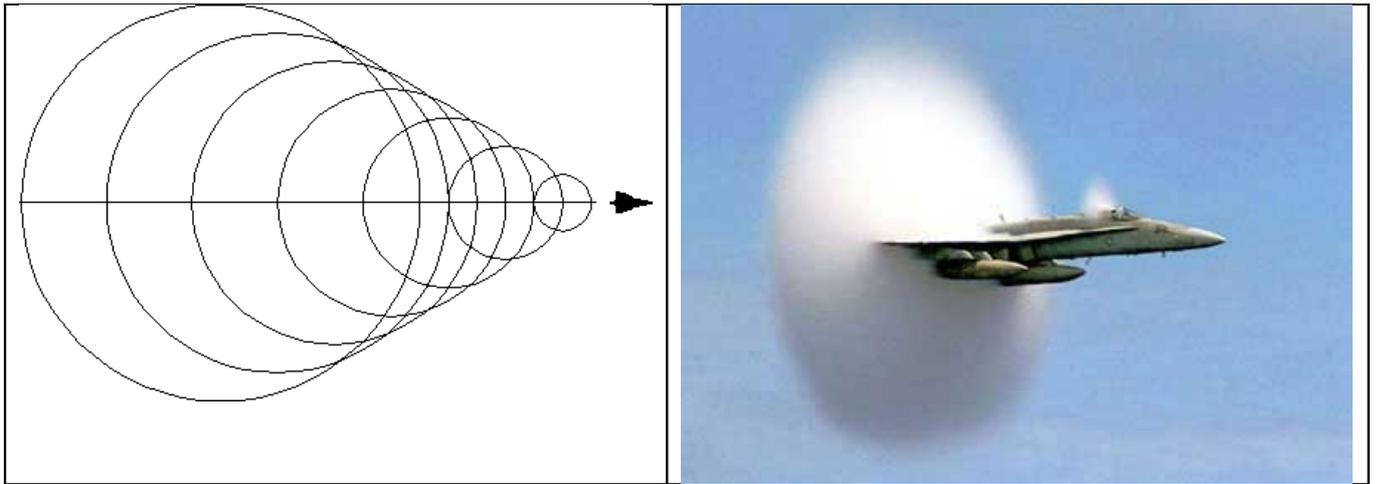


Figure 1 Thrusst : Première voiture à passer le mur du son

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.*

*Si des ondes émises par un objet immobile se réfléchissent sur une cible en mouvement, cette cible se comporte comme une source d'ondes. L'effet Doppler résultant, qui est le décalage de la fréquence réfléchi comparée à la fréquence émise, permet de déterminer la vitesse de la cible.*

## 5.3 APPLICATIONS

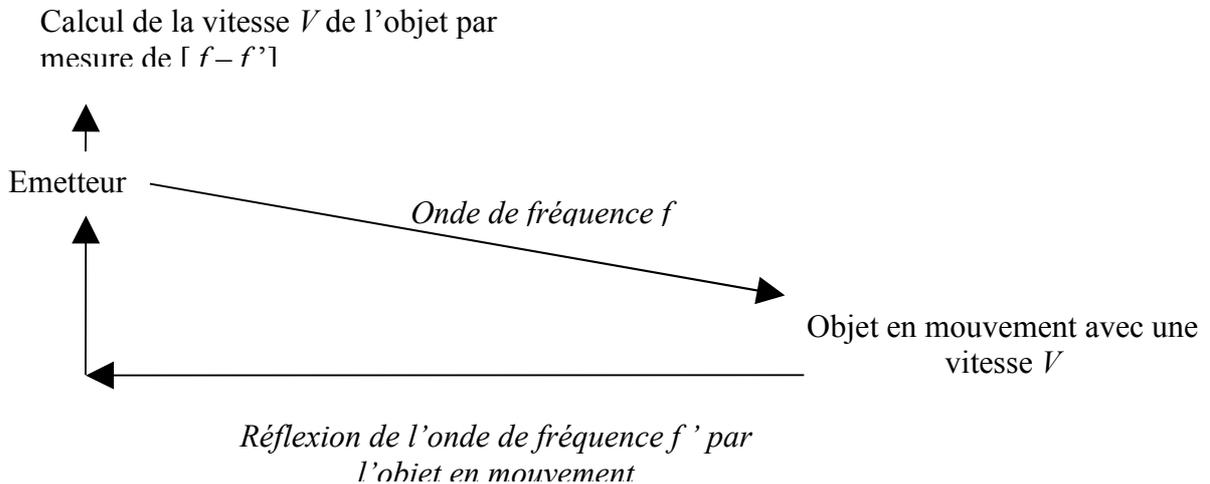
### 5.3.1 Détection des objets en mouvement

Un détecteur émet une onde de fréquence  $f$ . Celle-ci se réfléchit sur un objet en mouvement. La fréquence  $f'$  de l'onde réfléchi est différente de  $f$  et le récepteur réagit en émettant un signal.

### 5.3.2 Radar pour déterminer la vitesse d'une auto

L'onde électromagnétique ( micro-ondes de 8MHz ) de vitesse  $c$  utilisée par le radar est réfléchi par la voiture en mouvement.

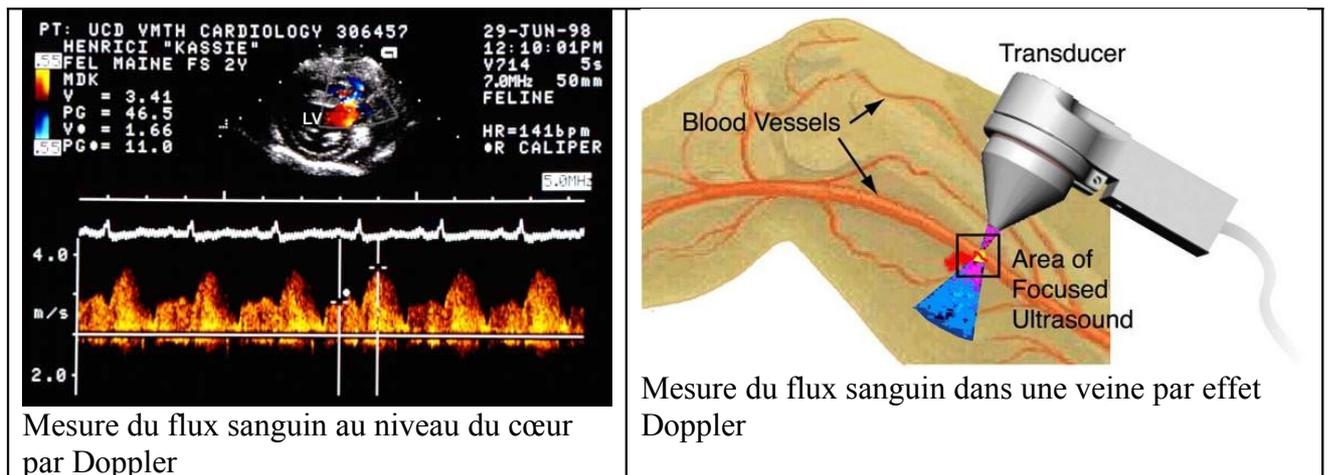
En calculant la différence entre  $f$  et  $f'$ , l'ordinateur peut calculer la vitesse de l'automobile qui a réfléchi l'onde.



### 5.3.3 Cardiologie

Utilisation de l'effet Doppler avec des ultrasons

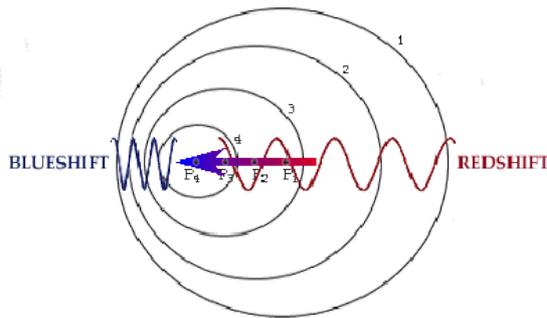
On lance des ultrasons sur les globules rouges → réflexion → calcul de la vitesse de circulation du sang → calcul de la pression sanguine → renseignement sur l'élasticité des parois



### 5.3.4 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.

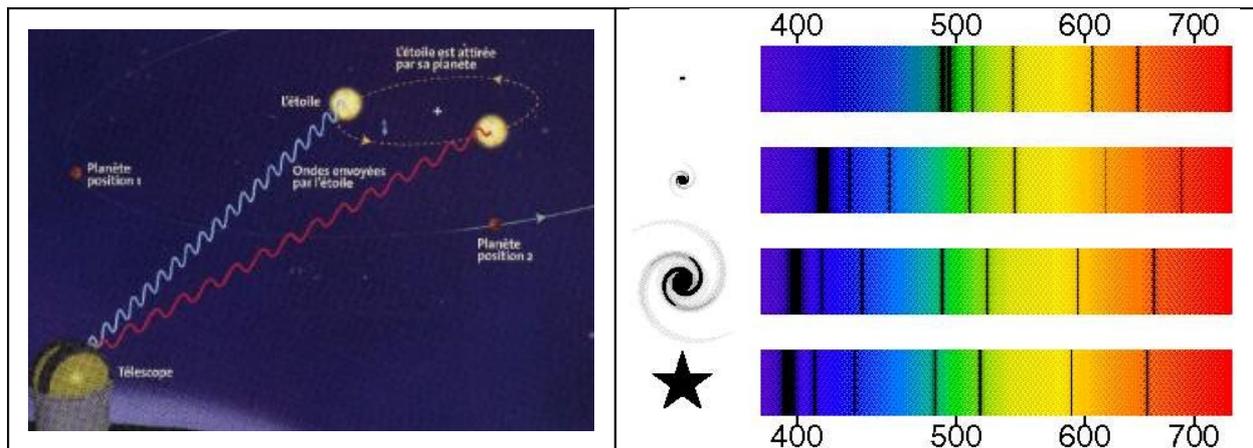


L'effet Doppler permet de comprendre ce phénomène.

Si l'étoile s'éloigne de nous, les fréquences des ondes lumineuses émises par celle-ci sont plus petites et on observe 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 et confirmer la théorie de l'expansion de l'Univers



### 5.3.5 Météorologie

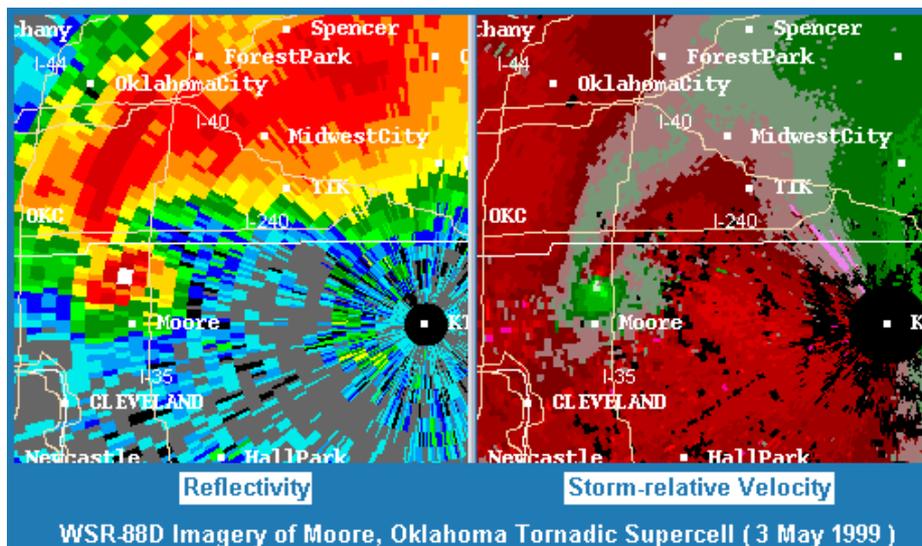


Figure 2 : Suivit d'une tornade de type 5 par Radar Doppler. Etude des quantités et des mouvements des précipitations.

## 6. Superposition de 2 ondes

### 6.1 INTRODUCTION

En un point d'un ressort, d'une corde, d'un milieu peuvent arriver en même temps deux ondes.

Ces ondes peuvent être produites par un seul oscillateur : chaque point est soumis en même temps à des ondes incidentes et à des ondes réfléchies

Ces ondes peuvent être produites par deux sources différentes : chaque point est soumis en même temps à des perturbations provenant de deux sources.

Que se passe-t-il alors ?

### 6.2 PRINCIPE DE SUPERPOSITION

Examinons les photos de la rencontre de deux ondes se propageant en sens inverse.

( voir pages suivantes)

A partir de ces exemples, nous constatons que :

***L'élongation résultante en un point, à un instant donné, est la somme algébrique des élongations en ce point de chacune de ces perturbations à cet instant.***

***Après la rencontre, les perturbations continuent à se propager indépendamment l'une de l'autre dans leur sens initial.***

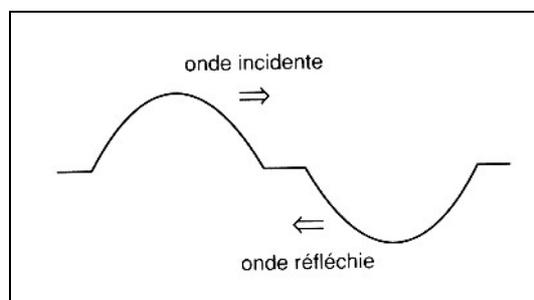
Voir pages suivantes :

***Superposition de deux ondes de même signe ou de deux ondes en phase***

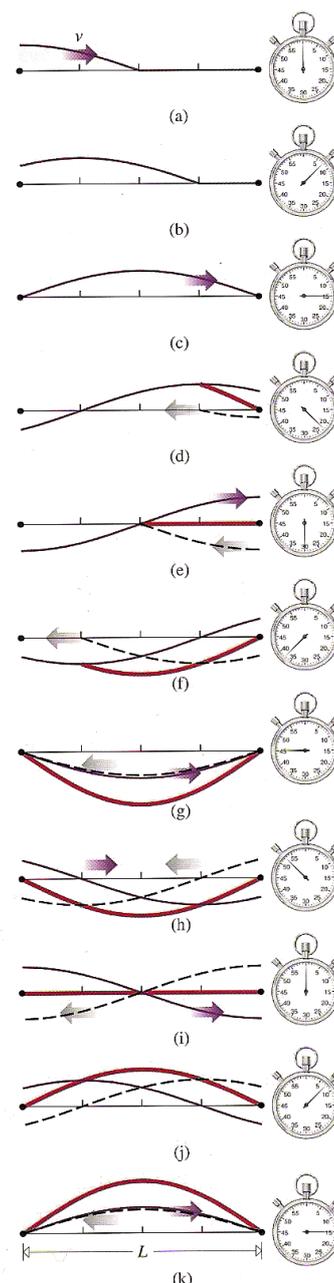
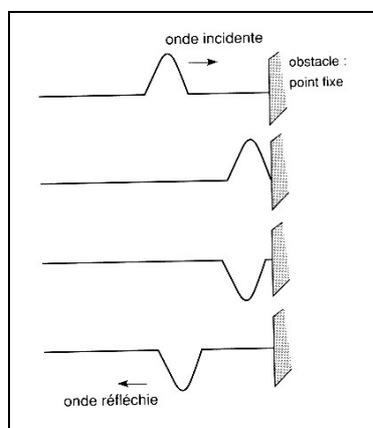
***Superposition de deux ondes de signe contraire ou de deux ondes en opposition de phase***

### 6.3 LE RÉGIME STATIONNAIRE

#### 6.3.1 Expérience



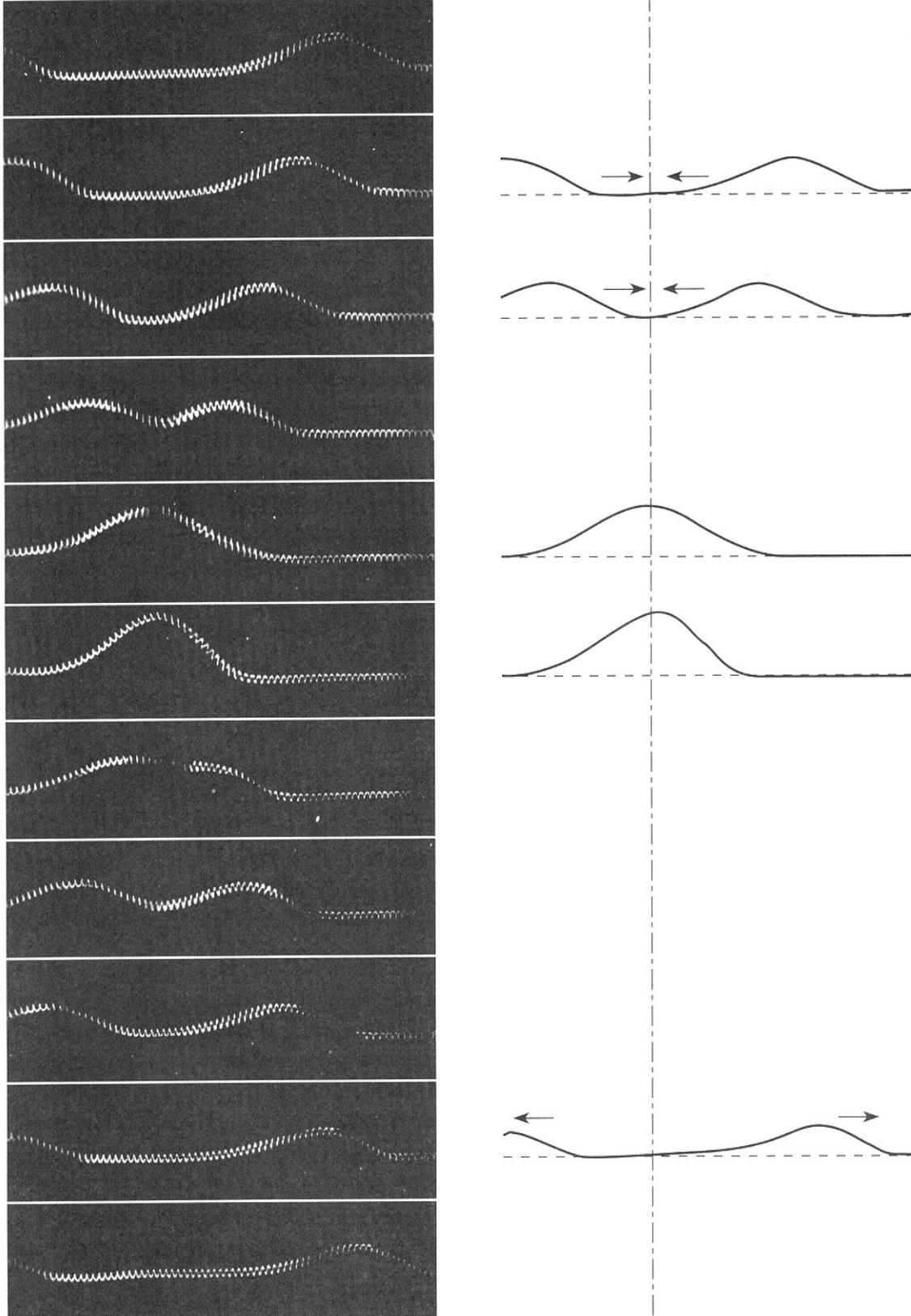
A l'extrémité d'une corde tendue ou d'un ressort, produisons un ensemble d'ondes [ondes incidentes]. Arrivées au bout de la corde, elles se réfléchissent et repartent en sens inverse et ce en changeant de signe [ondes réfléchies]



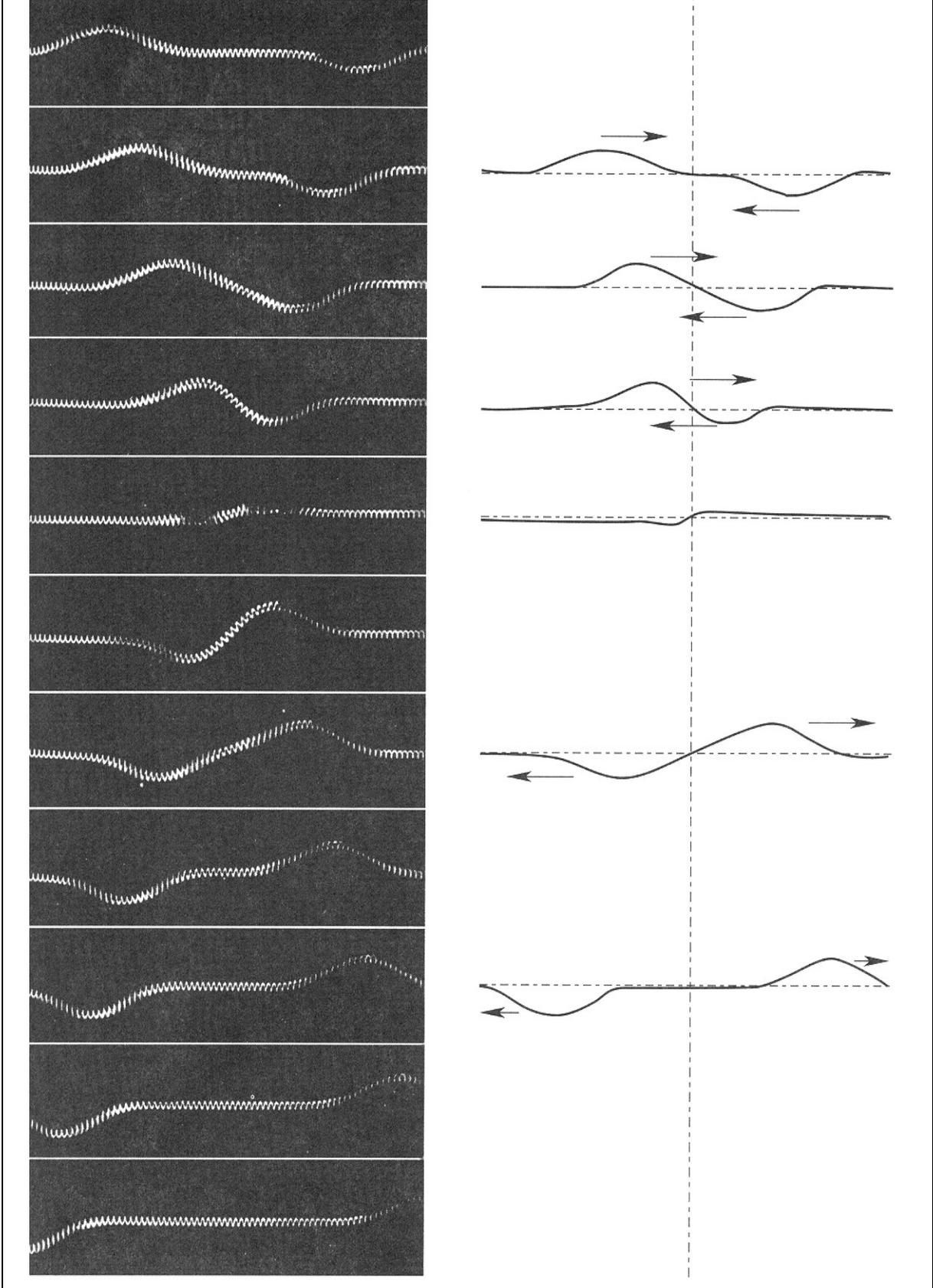
**Figure 13.24** Onde stationnaire sur une corde fixée aux deux extrémités. (a) L'onde entre à gauche, (d) et se réfléchit (courbe en pointillés) à l'extrémité droite de la corde. (g à k) Les deux ondes, incidente et réfléchie, se superposent pour former une onde stationnaire (en rouge), qui oscille en tout point qui n'est pas un nœud.

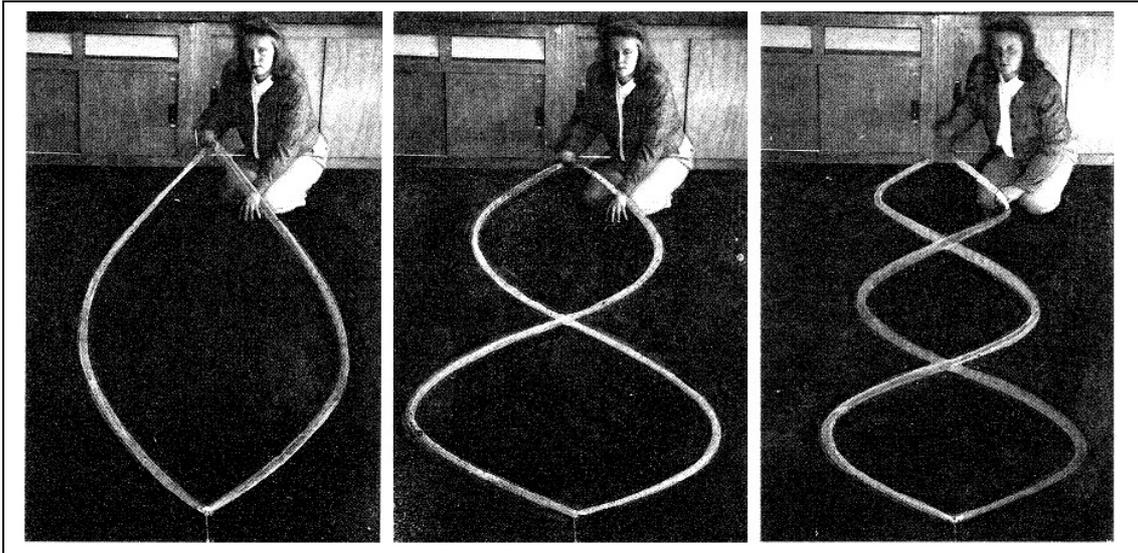
La corde est donc soumise en continu à des ondes incidentes venant de gauche et à des ondes réfléchies venant de droite.

***Superposition de deux ondes de même signe ou de deux ondes en phase***



*Superposition de deux ondes de signe contraire ou de deux ondes en opposition de phase*





*On observe un phénomène appelé : ondes stationnaires ou mode stationnaire*

*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.*

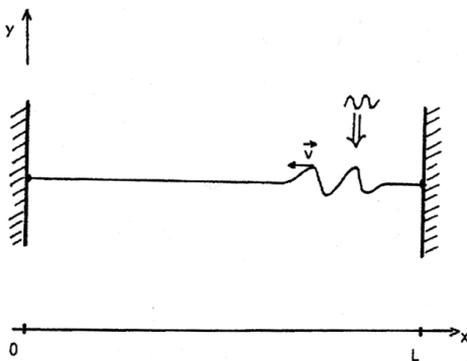
Ces points sont des points pour lesquels les 2 ondes arrivent constamment en phase.  
(voir schéma feuille suivante)

*La portion entre 2 nœuds est appelée fuseau.*

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

## Etude analytique

Une corde est tendue, fixée à ses deux extrémités ( $x = 0$  et  $x = L$ ). Si la corde est soumise à une déformation périodique ( $t \rightarrow \infty$ ), l'onde progressive créée et l'onde progressive réfléchie sur les extrémités vont se superposer pour donner naissance à un nouveau type d'onde : **une onde stationnaire**.



Soit en  $x = L$ , un moteur produisant une onde sinusoïdale appelée incidente  $y_i = A_i \sin(kx + \omega t)$  qui se propage de la droite vers la gauche. Cette onde va se réfléchir en  $x = 0$ , extrémité fixe, dont l'équation est  $y_r = A_r \sin(kx + \omega t)$

Puisque l'énergie se conserve, on a  $A_i = A_r = A$

En vertu du principe de superposition, la résultante vaut :

$$y = y_i + y_r$$

$$y = A \left[ \sin(kx + \omega t) + \sin(kx - \omega t) \right]$$

Appliquons Simpson :

$$y = A \left[ 2 \sin \frac{kx + \omega t + kx - \omega t}{2} \cos \frac{kx + \omega t - kx + \omega t}{2} \right]$$

$$\boxed{y = 2A \sin kx \cos \omega t}$$

Cette équation n'est plus celle d'une onde progressive. Les variables  $x$  et  $t$  ne sont plus liées dans une même fonction comme dans  $f(x-vt)$ . On constate que le maximum de déformation de l'onde ne se déplace plus : on a une **onde stationnaire**.

Comme la corde est fixée en l'extrémité  $x = L$ , il faut que là, en tout temps, la corde ne puisse bouger, donc

$$y_{x=L} = 0 = 2A \sin kL \cos \omega t$$

Cela n'est possible (pour tout  $t$ ) que si

$$\sin kL = 0 \rightarrow kL = n\pi$$

$$\text{or } k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} L = n\pi \rightarrow \boxed{\lambda = \frac{2L}{n}}$$

On en tire donc une première conclusion très importante :

Le fait que la corde soit fixée en ses deux extrémités (ce sont des **conditions aux limites**) et qu'elle soit soumise à une excitation périodique résulte en une **quantification** du problème : **les ondes ne peuvent exister sur cette corde que pour des fréquences particulières.**

Suivant les valeurs prises par le nombre **entier**  $n$ , différentes vibrations vont résider sur la corde.  **$n$  est un nombre quantique, puisqu'il détermine les états possibles.**

#### ➤ Mode fondamental : $n = 1$

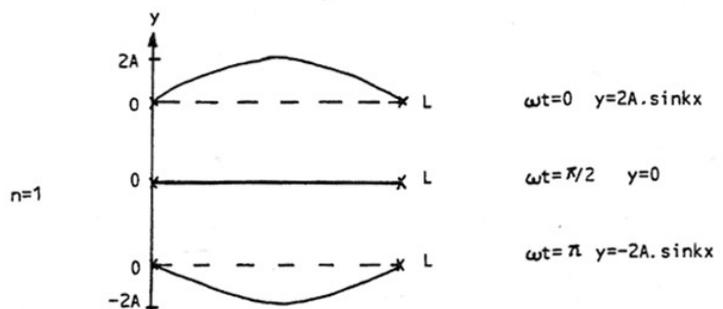
$$\text{Si } n = 1 \rightarrow \lambda = 2L \rightarrow k = \frac{\pi}{L} \rightarrow y = 2A \sin \frac{\pi x}{L} \cos \omega t$$

On déduit que la corde est le siège d'une onde de déformation de type sinusoïdale, dont la longueur d'onde est **double** de la longueur de la corde. En d'autres termes, sur la corde réside  $\frac{1}{2}$  longueur d'onde de la déformation. Cependant, l'amplitude de l'onde sinusoïdale varie avec le temps, selon une loi  $\cos \omega t$  (Voir figure)

La figure représente la fonction

$$2A \sin \frac{\pi x}{L} \text{ pour différents temps particuliers (Il faut se rappeler que } \omega t = \frac{2\pi}{T} t \text{). On remarque$$

que **tous les points de la corde vibrent en phase dans le temps, mais que chaque point de la corde a une amplitude différente.** Chaque point de la corde a sa propre amplitude de vibration, et **plus aucune déformation ne se propage de la gauche vers la droite et vice-versa.**



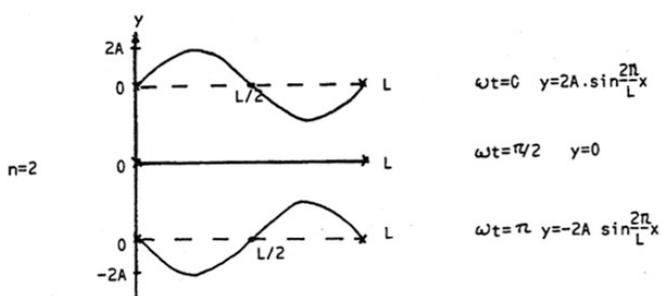
Cela nous amène à définir les **nœuds** et les **ventres**

- Les **nœuds** sont les points immobiles de la corde (ici il y en a deux)
- Les **ventres** sont les points de la corde qui ont le maximum d'amplitude.

➤ **Harmonique : n = 2**

Si  $n = 2 \rightarrow \lambda = L \rightarrow k = \frac{2\pi}{L} \rightarrow y = 2A \sin \frac{2\pi x}{L} \cos \omega t$

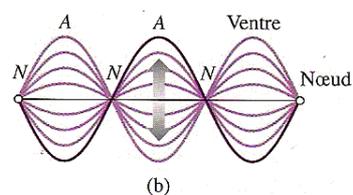
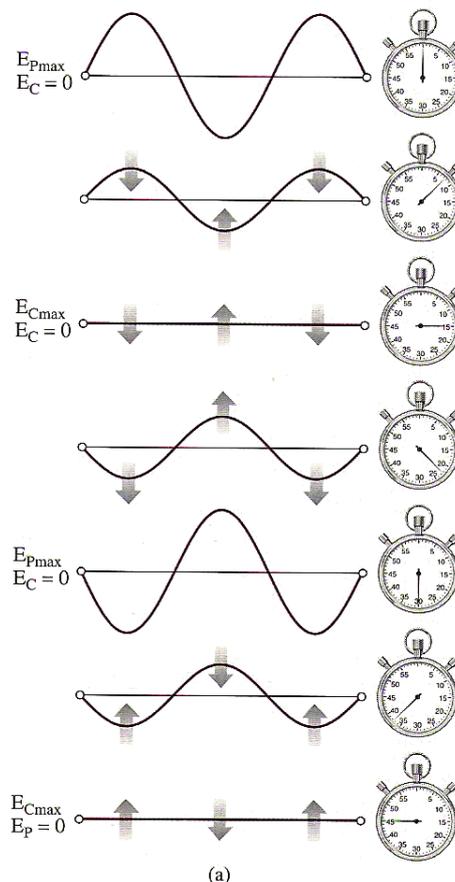
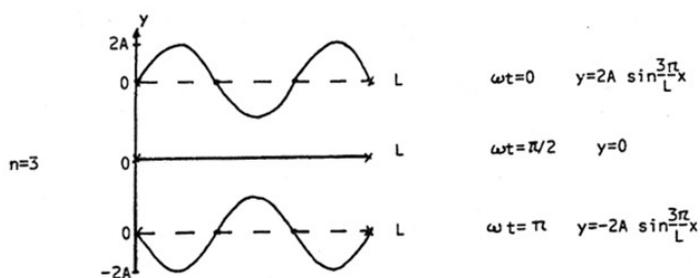
La figure 13.23 rapporte quelques états particuliers de cette vibration de la corde. Cette déformation se caractérise par l'existence de 2 ventres et de 3 nœuds.



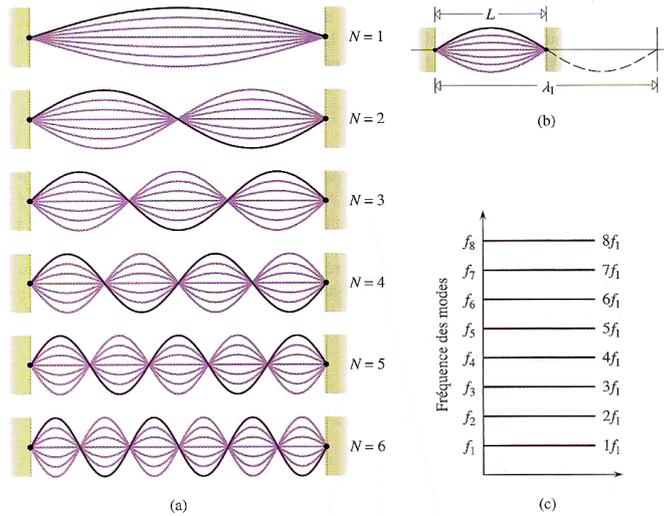
➤ **Harmonique : n = 3**

Si  $n = 3 \rightarrow \lambda = \frac{2}{3}L \rightarrow k = \frac{3\pi}{L} \rightarrow y = 2A \sin \frac{3\pi x}{L} \cos \omega t$

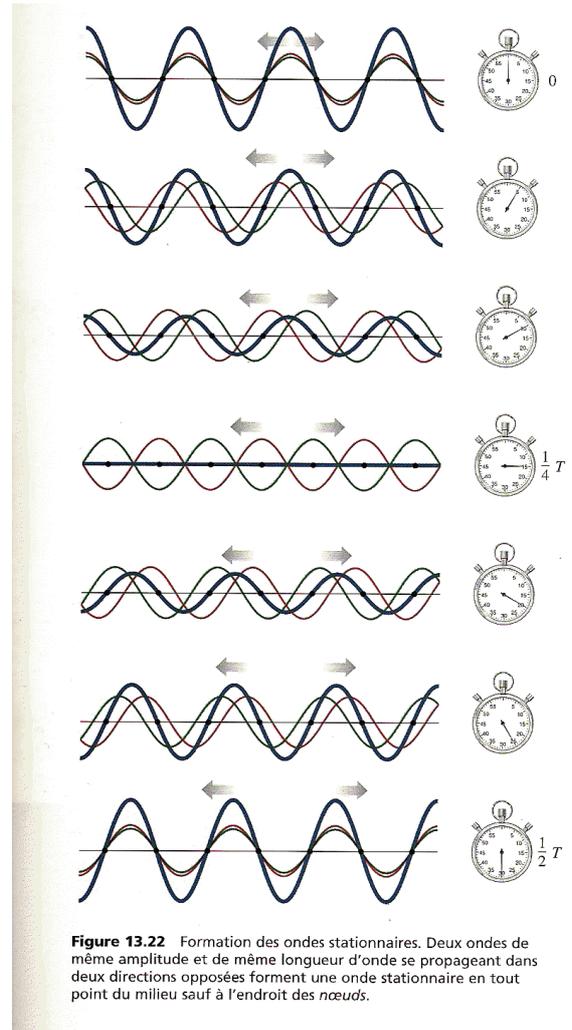
La corde soit sur sa longueur recevoir 3/2 longueur d'onde. Au cours de temps, l'amplitude de vibration des différents points de la corde varie selon les graphes de la figure. On y remarque l'existence de 3 ventres et 4 nœuds.



**Figure 13.23** (a) Une onde stationnaire sur une corde, dont les deux extrémités sont fixes. (b) représentation de toutes les configurations de (a). La zone comprise entre deux nœuds est un fuseau.



**Figure 13.25** (a) Modes d'une onde stationnaire sur une corde avec un nœud à chaque extrémité. (b) La longueur d'onde du mode fondamental ( $N = 1$ ) est  $2L$ . (c) Quelques premiers modes d'oscillation (harmoniques).



**Figure 13.22** Formation des ondes stationnaires. Deux ondes de même amplitude et de même longueur d'onde se propageant dans deux directions opposées forment une onde stationnaire en tout point du milieu sauf à l'endroit des nœuds.

De façon générale, deux ondes de même amplitude et de même longueur d'onde se propageant dans des directions opposées donnent une onde stationnaire.

## CONCLUSIONS

*Deux ventres voisins, sont séparés par une demi-longueur d'onde  $\frac{\lambda}{2}$ . De même, pour la distance séparant deux nœuds voisins*

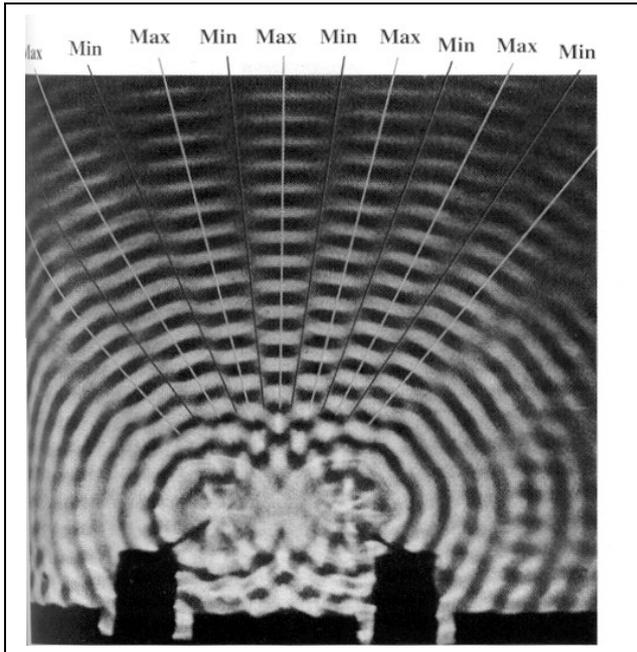
*La distance séparant un nœud d'un ventre voisin est donc de  $\frac{\lambda}{4}$*

## 6.4 LES INTERFÉRENCES

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

### 6.4.1 Expérience et conclusions

Deux pointes S1 et S2 s'enfoncent au même rythme dans la cuve à ondes.



*On observe des couloirs limités par des lignes incurvées sur lesquelles 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)*

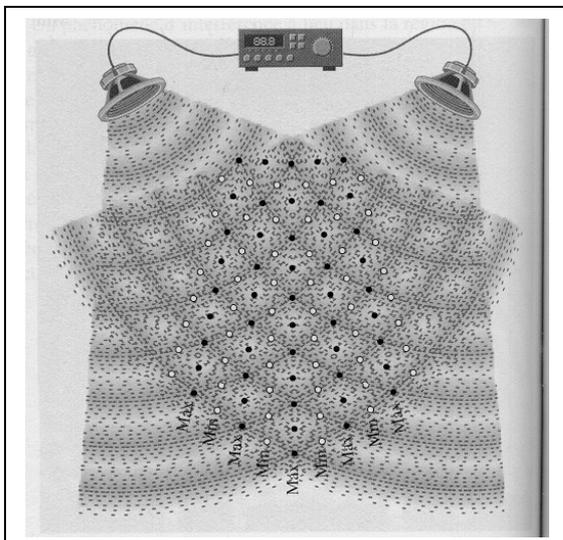
*La superposition de 2 ondes de même fréquence est appelée interférence.*

*Ce phénomène engendre dans l'espace des points immobiles et des points vibrant au maximum.*

*Ainsi la superposition*

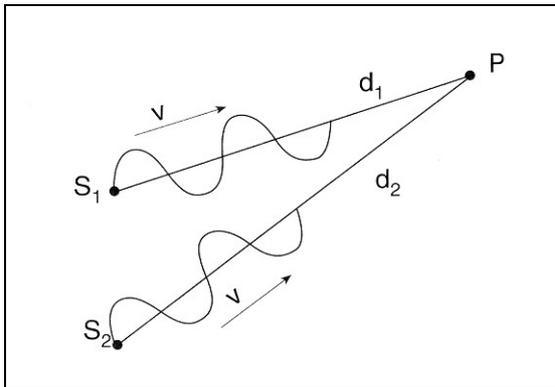
- *de deux mouvements peut donner le repos*
- *de deux sons peut donner le silence*
- *de deux lumières peut donner l'obscurité* (voir module lumière)

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).

### 6.4.2 Etude analytique



Soient deux ondes, chacune issue d'une source différente ( $S_1$  et  $S_2$ ). Pour simplifier considérons que les amplitudes et les fréquences sont identiques. Considérons aussi un point  $P$  situé à une distance  $d_1$  de  $S_1$  et à une distance  $d_2$  de  $S_2$ . L'équation issue de  $S_1$  et arrivant en  $P$  est :

$$y_{S_1} = A \sin(kd_1 - \omega t)$$

Et celle issue de  $S_2$ , arrivant en  $P$ , est :

$$y_{S_2} = A \sin(kd_2 - \omega t)$$

Le point  $P$  est soumis à 2 ondes de même fréquence, de même amplitude. Appliquons le principe de superposition

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(kd_1 - \omega t) + A \sin(kd_2 - \omega t) = 2A \sin\left(\frac{k(d_1 + d_2)}{2} - \omega t\right) \cos\frac{k(d_1 - d_2)}{2}$$

Le mouvement résultant est donc sinusoïdal et son amplitude est  $2A \cos\frac{k(d_1 - d_2)}{2}$

#### Equation des lignes tempêtes: interférence constructive

Cette amplitude sera maximale ( $= 2A$ ) si  $\left| \frac{k(d_1 - d_2)}{2} \right| = n\pi$  or  $k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \boxed{|d_1 - d_2| = 2n \cdot \frac{\lambda}{2}}$

$(d_2 - d_1)$  est appelé la *différence de marche*.

***Pour les points  $P$  qui vérifient cette équation, on peut dire qu'il y a superposition de 2 vibrations en concordance de phase ; on dit qu'il y a interférence constructive (les ondes s'ajoutent)***

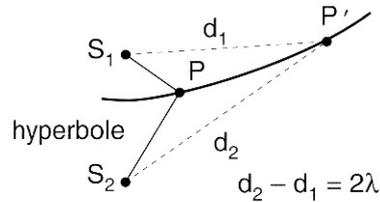
#### Equation des lignes de repos : interférence destructive

Cette amplitude sera minimale ( $= 0$ )

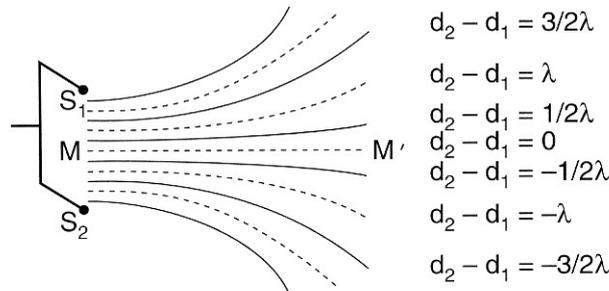
$$\left| \frac{k(d_1 - d_2)}{2} \right| = (2n + 1)\pi \text{ or } k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \boxed{|d_1 - d_2| = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}}$$

***Pour les points  $P$  qui vérifient cette équation, on peut dire qu'il y a superposition de 2 vibrations en opposition de phase ; on dit qu'il y a interférence destructive (les ondes se détruisent)***

Les équations des lignes tempêtes et de repos sont des équations d'hyperboles dont  $S_1$  et  $S_2$  sont les foyers.



L'ensemble de ces lignes forme une figure d'interférences



L'étude des figures d'interférences permet la mesure de la longueur d'onde des ondes et par la suite la vitesse  $V$  de ces ondes.

***Cette figure d'interférences est un critère pour détecter le caractère ondulatoire d'un phénomène.***

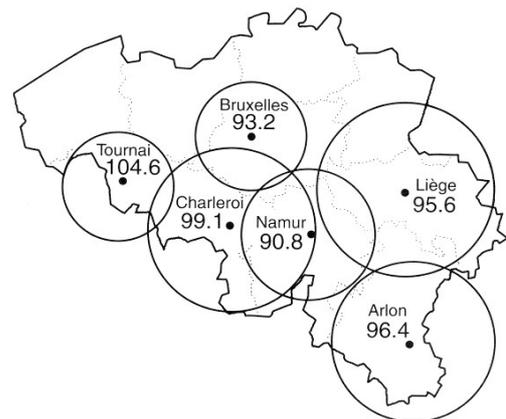
### 6.4.3 Exemple d'application

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'émetteurs 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.



On retrouve ces valeurs indiquées sur des panneaux placés au bord des autoroutes.

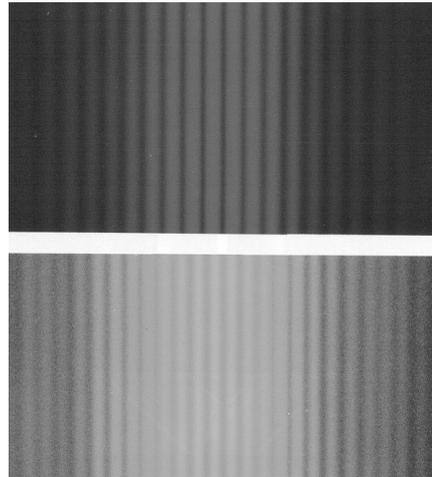
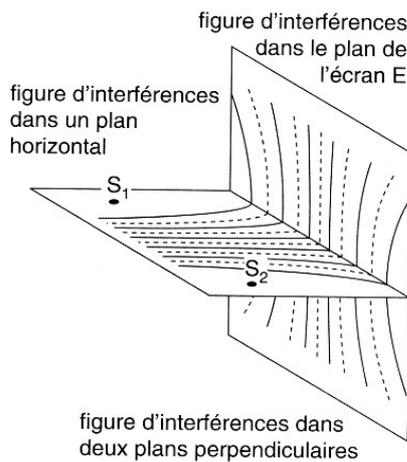
## 7. Nature ondulatoire de la lumière

### 7.1 INTERFÉRENCES LUMINEUSES

#### 7.1.1 Les 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  $S_2$  de mêmes fréquences.

Regardons ce qui se passe dans le champ 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 l'intensité de la lumière est maximale et des lignes où l'intensité de la lumière est nulle.*

*Ce qui veut dire que lumière + lumière = obscurité*

*Cette expérience montre que la lumière a un caractère ondulatoire et donc que la lumière est une onde. Elle doit être caractérisée dès lors par une fréquence  $f$  et une longueur d'onde.*

#### 7.1.2 Etude analytique

Recherchons sur l'écran, les points  $P$  qui ont un éclairement maximal (les ventres). Ce point sera un point où l'éclairement est maximum s'il est situé sur une ligne où l'amplitude est

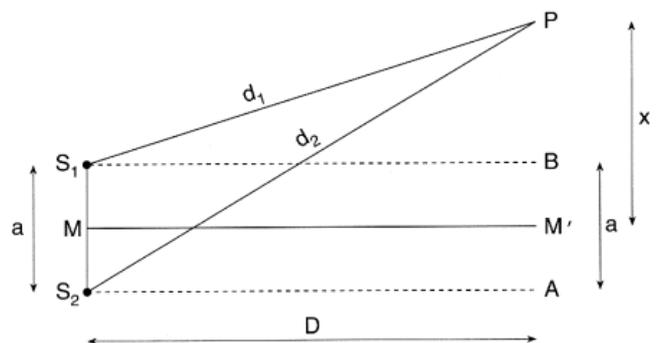
maximale ou si :  $|d_2 - d_1| = 2k \frac{\lambda}{2}$  ( $k \in \mathbb{Z}$ )

Calculons la différence de marche  $d_2 - d_1$

Soient :  $a$  la distance  $S_1S_2$  entre les 2 fentes, et  $D$  la distance entre le plan des fentes et l'écran  $E$ .

- Dans le triangle  $S_2PA$ , par Pythagore,

$$d_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 \quad (1)$$



- Dans le triangle  $S_1PA$ , par Pythagore,

$$d_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 \quad (2)$$

En distribuant et en soustrayant (2) de (1), on trouve

$$d_2^2 - d_1^2 = 2\frac{a}{x} \rightarrow (d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2\frac{a}{x}$$

Comme  $a$  et  $x$  sont très petits vis-à-vis de  $D$ ,  $d_1$  et  $d_2$  peuvent être considérés comme pratiquement parallèles et égaux à  $D$

$$d_2 + d_1 \approx 2D$$

Cependant cette approximation ne peut être faite sur la différence  $d_2 - d_1$  car dans ce cas l'erreur relative serait de 100 %. Dès lors, on peut écrire

$$d_2 - d_1 = \frac{ax}{D}$$

Pour que l'éclairement soit maximum en un point  $P$  de l'écran il faut que

$$|d_2 - d_1| = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k \in \mathbb{Z})$$

Et donc :

$$\frac{ax}{D} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

A un  $k$  donné correspond un  $x$  que nous appellerons  $x_k$

$$x_k = k \frac{\lambda D}{a}$$

Par exemple la position des différents maxima sera donnée par :

$$x_0 = 0 \times \frac{\lambda D}{a}; x_1 = 1 \times \frac{\lambda D}{a}; x_2 = 2 \times \frac{\lambda D}{a}; \dots$$

Si nous appelons **interfrange** la distance  $i$  telle que :

$$i = x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = \dots = x_k - x_{k-1}$$

Alors

$$i = \frac{\lambda D}{a} \rightarrow \boxed{\lambda = \frac{i a}{D}}$$

## Calcul de $\lambda$

Une expérience réalisée en lumière jaune avec les données suivantes :  $a = 1 \text{ mm}$  et  $D = 1.75 \text{ m}$ , donne pour résultat  $i = 1 \text{ mm}$ . Donc :

$$\lambda = \frac{10^{-3} \times 10^{-3}}{1.75} = 0.57 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

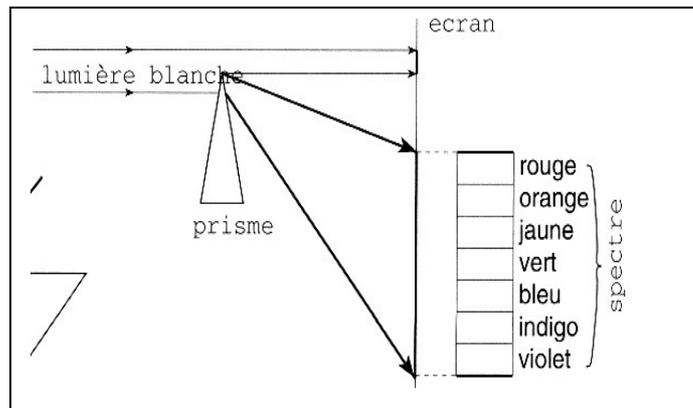
La valeur de la longueur d'onde de la lumière jaune est donc extrêmement petite : de l'ordre du micromètre. C'est raison pour laquelle on exprime la longueur d'onde en **nanomètre** (nm) :  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ . Donc inversement :  $1 \text{ m} = 10^9 \text{ m}$ . Ainsi,  $\lambda = 0.57 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.57 \cdot 10^{-6} \cdot 10^9 = 570 \text{ nm}$ .

Nous pouvons aussi calculer la fréquence :  $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{0.57 \cdot 10^{-6}} = 5.26 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

## 7.2 DISPERSION DE LA LUMIÈRE PAR UN PRISME

Nous avons déjà tous remarqué que lorsqu'on regarde 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***

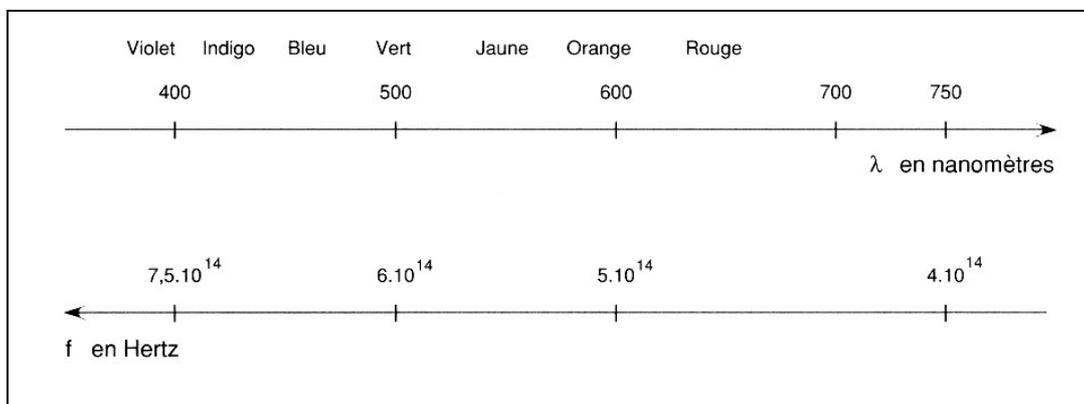
La lumière blanche étant un mélange des différentes couleurs est dite : lumière ***polychromatique***

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

Le spectre visible s'étale

de 400 nm ( $= 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ) pour le violet

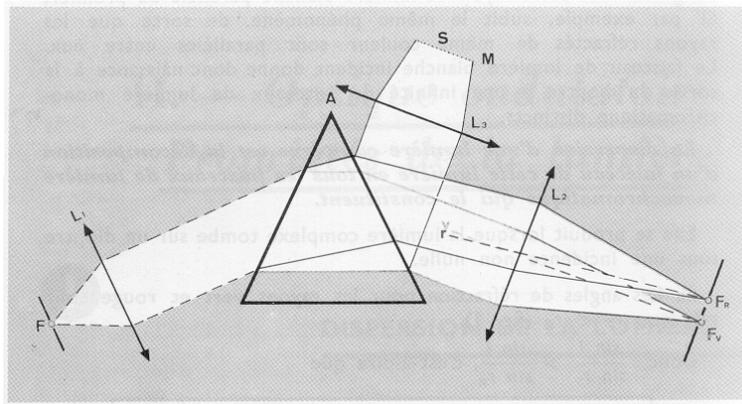
à 800 nm ( $= 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ) pour le rouge



## 7.3 IDENTIFICATION D'UNE SOURCE LUMINEUSE ; SPECTRE DE RAIES

### 7.3.1 Le spectroscope

Le spectroscope 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.



### 7.3.2 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 et ses propres raies.*

