



# Les ondes comme porteuses d'informations

---

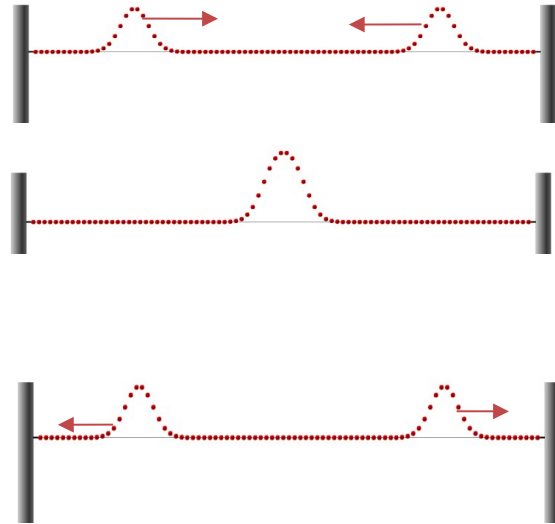
Les ondes permettent la propagation d'énergie et en tant que telles transportent des informations : mouvements, températures, ... Les comportements caractéristiques des ondes : interférences, diffraction, effet Doppler, réfraction et réflexion, dépendent de grandeurs associées à ces ondes (fréquence, longueur d'onde, célérité, ...) ou à des grandeurs associées aux objets responsables de ces phénomènes (largeur d'un obstacle, distance entre deux sources d'ondes interférentes, ...). L'observation et l'exploitation de ces phénomènes peuvent permettre des mesures souvent fines des valeurs de ces grandeurs.

# Superposition des ondes

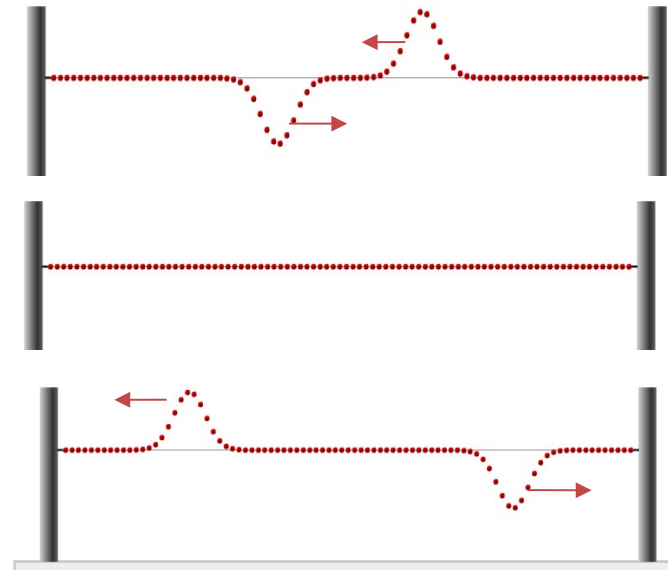
[http://www.ostralo.net/3\\_animations/swf/croisement\\_ondes.swf](http://www.ostralo.net/3_animations/swf/croisement_ondes.swf)

---

CROISEMENT DE DEUX ONDES



v



# Superposition des ondes

---

Quand deux ondes de même nature se croisent, l'onde résultante est :

**la somme algébrique des deux contributions.**

Au-delà du point de croisement, les deux ondes

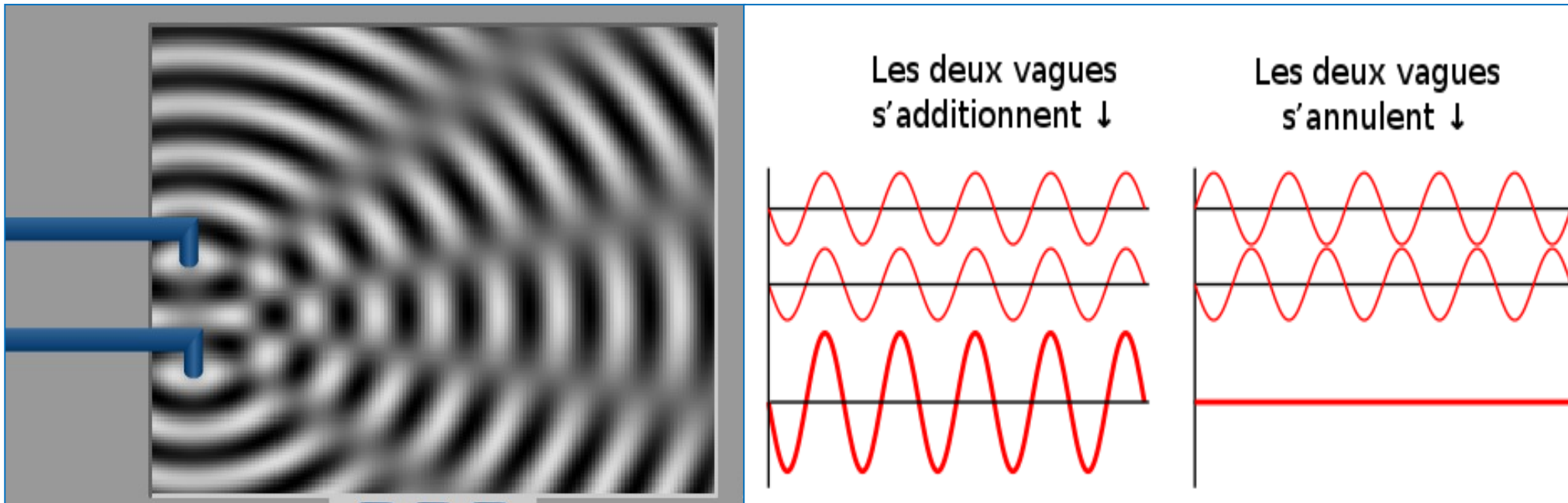
**continuent**

**leur propagation sans être**

**modifiée** l'une par l'autre.

# Interférences

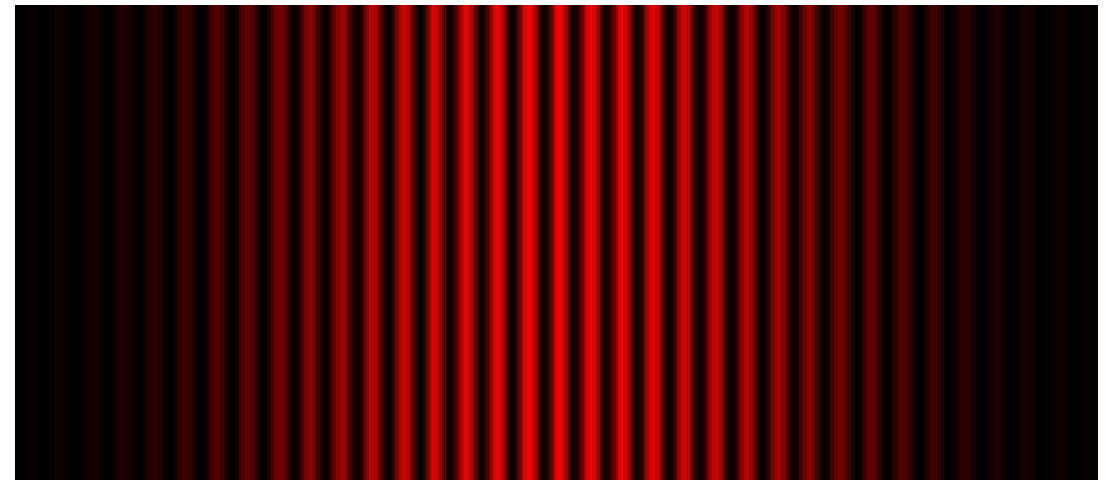
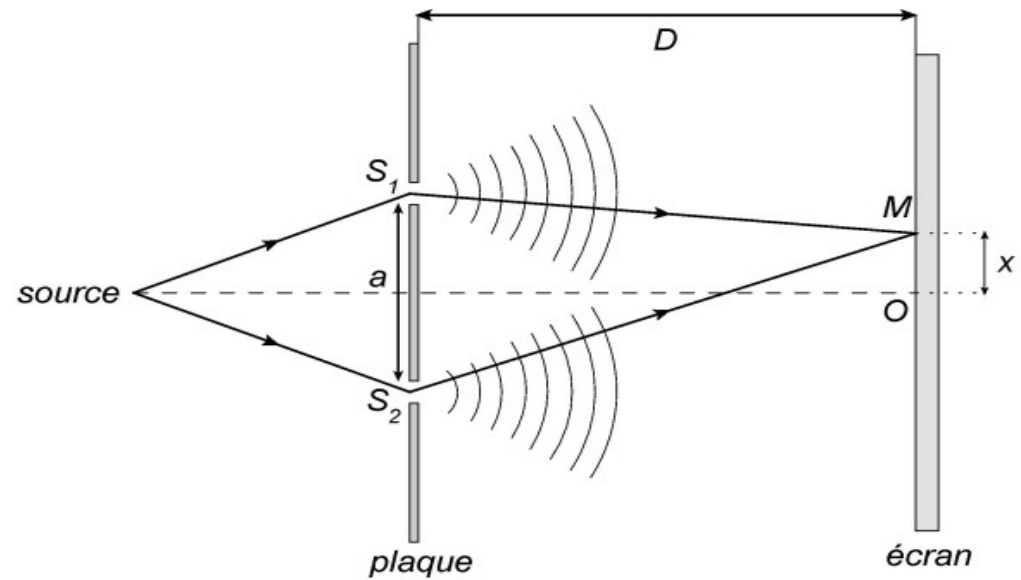
[http://www.ostralo.net/3\\_animations/swf/cuve\\_ondes\\_circulaires.swf](http://www.ostralo.net/3_animations/swf/cuve_ondes_circulaires.swf)



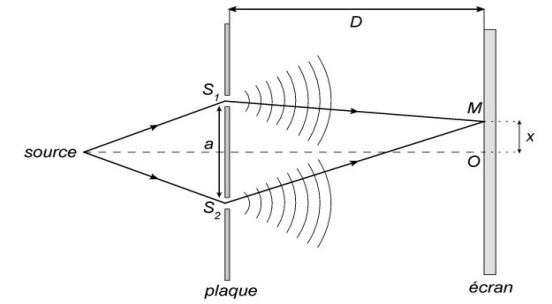
# Interférences

[http://www.ostralo.net/3\\_animations/swf/interferences.swf](http://www.ostralo.net/3_animations/swf/interferences.swf)

---







- **la superposition est constructive** : dans ce cas les ondes sont en retard l'une par rapport à l'autre d'un multiple entier de fois la période. Ceci s'écrit :

**Superposition est constructive** :  $\Delta t = p.T$  avec  $p \in \mathbb{Z}$ .

- Ceci peut encore s'écrire : si  $v$  est la célérité de l'onde dans le milieu de propagation :

$\Delta t = p.T \Rightarrow \Delta = p.\lambda$  : la différence de chemin parcourue est un multiple entier de la longueur d'onde dans le milieu considéré.

**Superposition est constructive** :  $\Delta = p.\lambda$  avec  $p \in \mathbb{Z}$ .

On peut écrire de même :

- **la superposition est destructive** : dans ce cas les ondes sont en retard l'une par rapport à l'autre d'un multiple entier de fois la demi-période : les ondes sont en opposition de phase. Ceci s'écrit :

---

**Superposition est destructive :**

$$\Delta t = (2p+1) \cdot \frac{T}{2} \text{ avec } p \in \mathbb{Z}.$$

**Superposition est destructive :**

$$\delta = (2p+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ avec } p \in \mathbb{Z}.$$

**Superposition est destructive :**

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T} = \frac{2\pi \cdot \Delta \ell}{\lambda} = (2p+1) \cdot \pi \text{ avec } p \in \mathbb{Z}.$$

# Nature de la lumière

---

La nature de la lumière a fait l'objet d'un débat qui a duré plusieurs siècles et qui opposait deux conceptions distinctes :

- un caractère corpusculaire et/ou une propagation d'une perturbation d'un milieu matériel particulier : l'éther.
- un caractère ondulatoire qui peut se propager dans tout milieu transparent et translucide dont le vide.

Cette dernière conception fut acceptée au début du XIXème siècle notamment après les travaux de Thomas Young et d'Augustin Fresnel. Le modèle de la propagation de type électromagnétique a pu être construit à partir des théories de James Clerk Maxwell, Gauss et Faraday notamment.

Les rayonnements sont émis :

- par des charges en mouvement accélérés ;
- par des dipôles (deux charges opposées) oscillants.



Einstein, au début du XXème siècle, a montré que la lumière n'est pas distribuée de manière continue mais de manière concentrée en certains points qui se déplacent avec l'onde : les photons. L'énergie transportée par ces photons est liée aux caractéristiques du comportement ondulatoire :

$$E = h.c/\lambda = h.v,$$

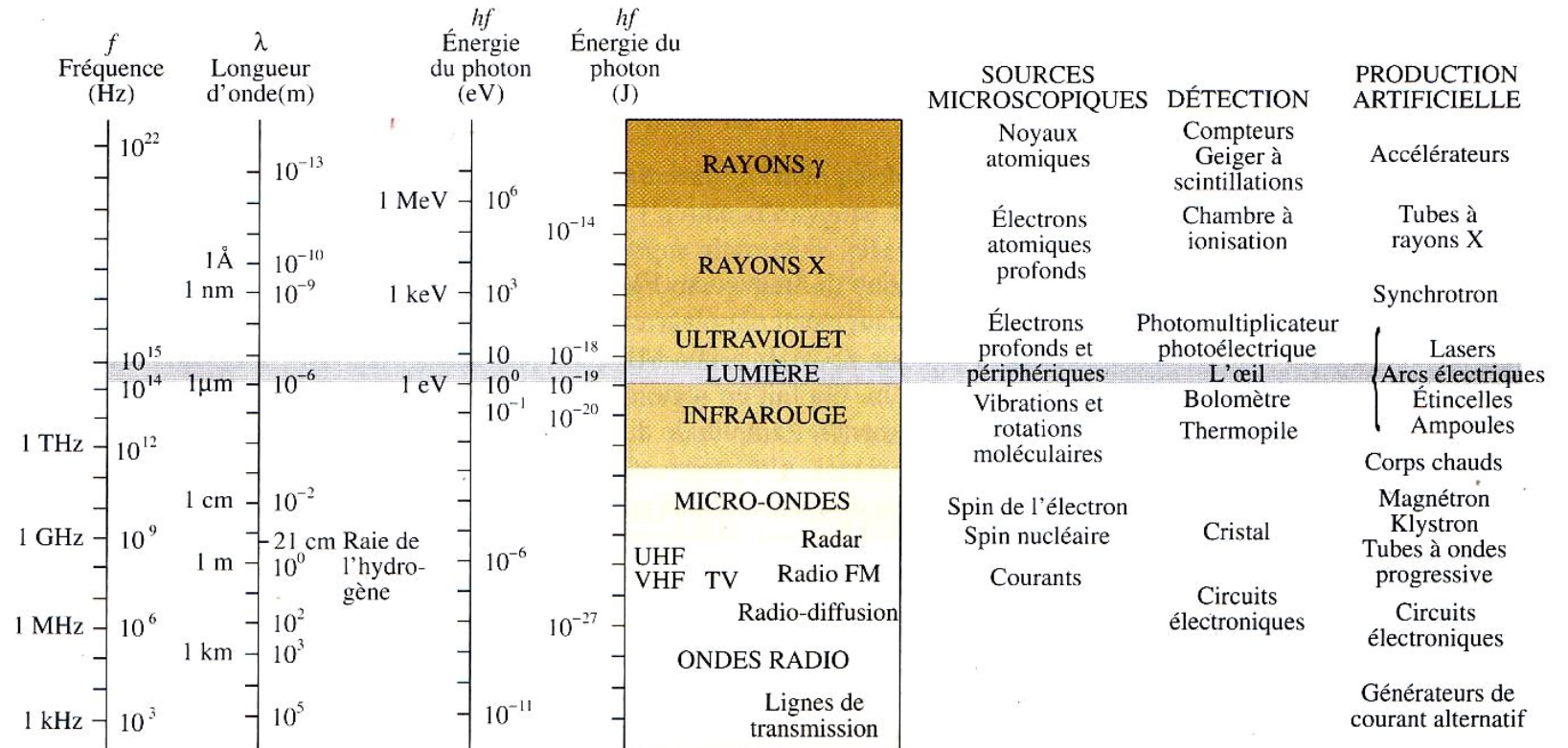
$h$  est la constante de Planck

$$h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}^{-1},$$

$c$  est la célérité de la lumière dans le vide :

$$c = 2,99792458.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$= 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$



La lumière en interaction avec la matière se comporte comme des particules animées de la célérité  $c$  dans le vide ou que l'on peut aussi considérer comme une onde.

---

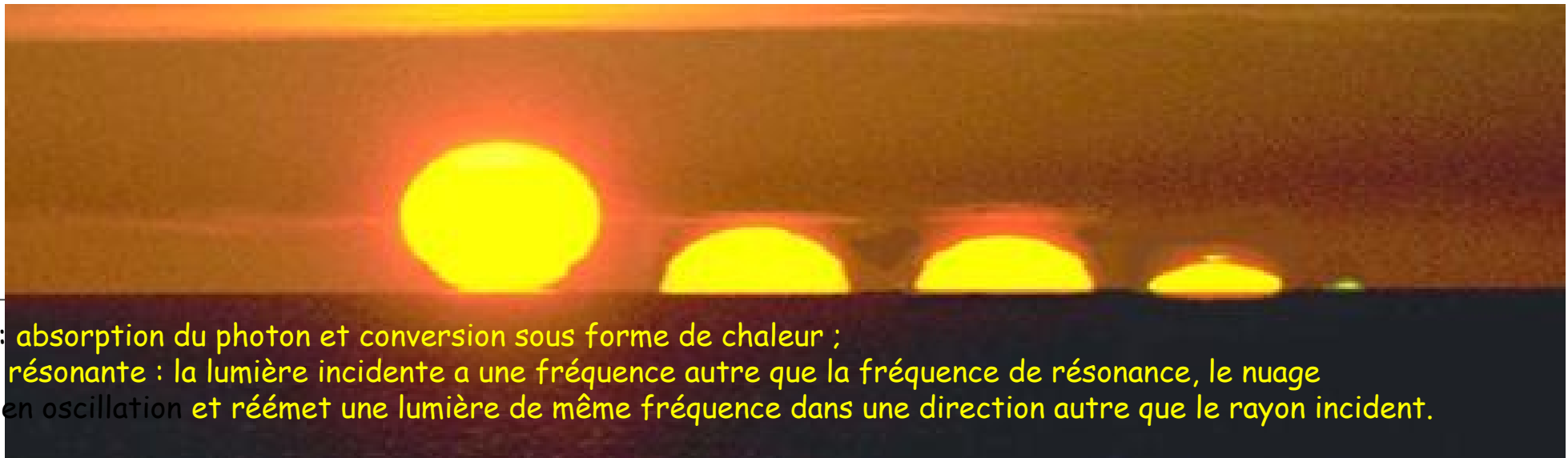
Le processus de production de lumière est dû à la présence d'électrons liés au noyau. L'énergie fournie à un atome lors d'une collision avec un autre atome, un photon ou un électron, affecte cette situation et l'atome passe à un état excité spécifique à chaque atome.

Lorsqu'une quantité d'énergie est fournie à un atome, il peut réagir en l'absorbant et sauter d'un niveau d'énergie à un autre. Cette quantité d'énergie est quantifiée : c'est un phénomène de résonance.

L'atome excité restitue l'énergie sous forme de lumière ou de chaleur, les oscillations s'effectuant de manière décroissante (train d'onde = photon).

Le processus d'absorption de la lumière plus émission est appelé

**diffusion.**



On distingue :

- l'absorption dissipative : absorption du photon et conversion sous forme de chaleur ;
- diffusion élastique non résonante : la lumière incidente a une fréquence autre que la fréquence de résonance, le nuage électronique peut entrer en oscillation et réémet une lumière de même fréquence dans une direction autre que le rayon incident.

Exemple : un faisceau étroit de lumière provenant du Soleil, en l'absence de matière, n'est pas diffusé. Ce faisceau ne peut pas être vu de côté.

En traversant l'atmosphère, les photons ne sont pas absorbés, les fréquences de résonance des molécules de diazote ou de dioxygène se situent dans l'ultra violet.

Néanmoins, le nuage électronique peut être forcé à vibrer comme un petit oscillateur. Le photon absorbé, un autre est réémis avec la même fréquence mais dans une direction aléatoire. En l'absence d'atmosphère, le jour serait aussi noir que dans l'espace, ou sur la Lune. De plus, l'amplitude des oscillations augmente avec la fréquence ; de fait le bleu est plus diffusé que les jaunes et rouges. Ceci donne l'apparence :

bleutée

du ciel et donc en vision directe, la teinte complémentaire

jaune

du Soleil.

En fin de journée, le faisceau lumineux provenant du Soleil, traverse une plus grande épaisseur d'atmosphère ; la lumière diffusée s'enrichit en lumière

verte puis jaune .



Plage circulaire creusée  
par la mer (Pylos, Grèce)



# Diffraction de la lumière

Vue du port de Zumaia (pays basque espagnol)



Le port de San Sébastian (pays basque espagnol),  
photographié à marée basse



Deux photographies aériennes ont des points communs : quelles sont ces photographies et indiquer leurs similitudes.

---

Faire une représentation schématique des trois photographies aériennes, en faisant apparaître les sommets des vagues et quelques longueurs d'onde.

Que peut-on observer quand les vagues atteignent l'entrée d'un port ?

Dans l'une des situations précédentes, on dit que l'onde est diaphragmée. Laquelle est-ce ?

---

La formation des ondes circulaires à l'entrée du port est un phénomène général appelé diffraction d'une onde. A quelle condition une onde sera-t-elle diffractée ?



Lorsqu'une onde mécanique ou lumineuse rencontre une ouverture ou un obstacle, on peut observer un :

**élargissement angulaire du faisceau,**

c'est le phénomène de :

**diffraction.**

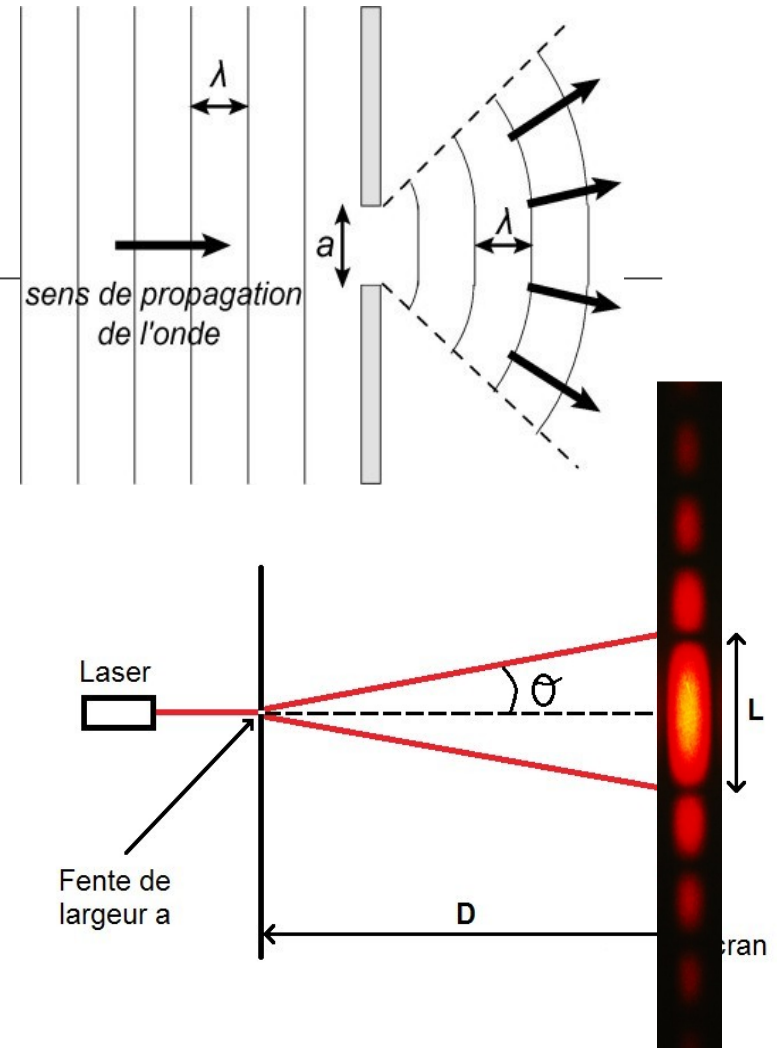
La longueur d'onde reste inchangée.

L'importance du phénomène de diffraction peut-être mesurée à l'aide de l'angle caractéristique de diffraction :  $\theta$ .

Dans le cas d'une ouverture rectangulaire de largeur  $a$ , la valeur  $\theta$  de l'angle de diffraction a pour expression.

$\theta$  : angle de la zone perturbée en radian : rad  $\lambda$  : longueur d'onde de l'onde en m  $a$  : largeur de l'ouverture en m.

-



De manière générale, lorsqu'une onde rencontre un obstacle de largeur  $a$ ,

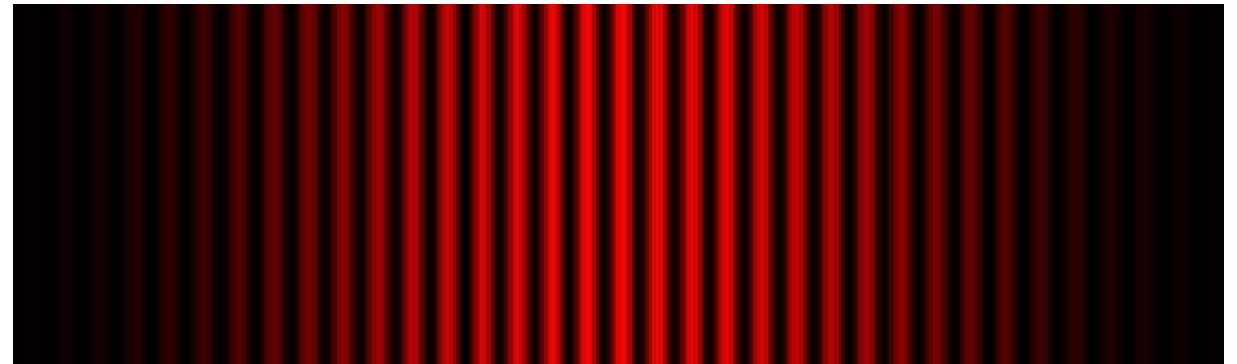
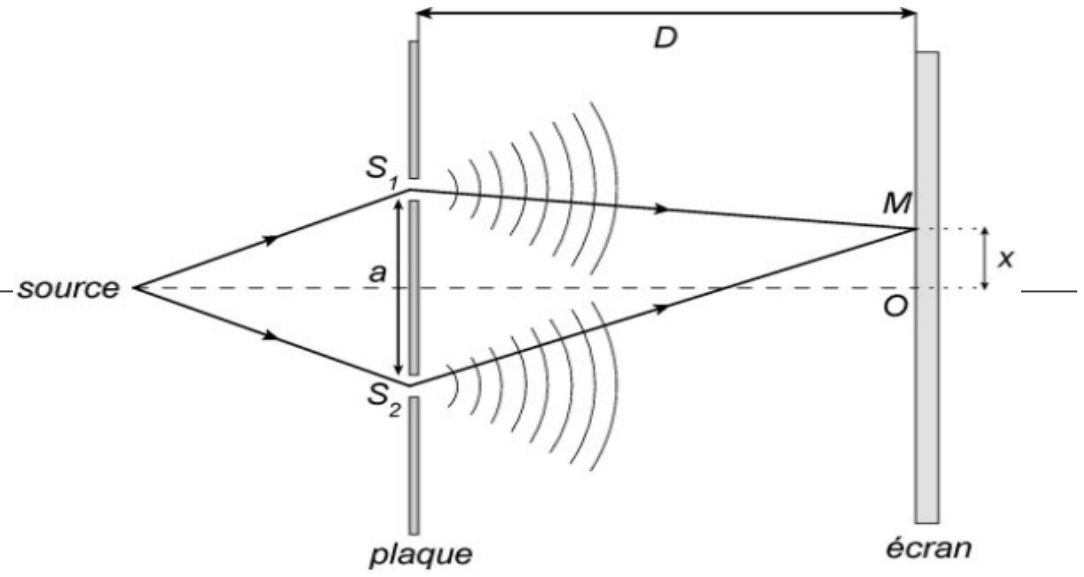
- = l'onde est diffractée parallèlement à l'obstacle ;
- = la valeur  $\theta$  de l'angle de diffraction est proportionnelle au rapport :

$$\theta = k \cdot \frac{\lambda}{a}$$

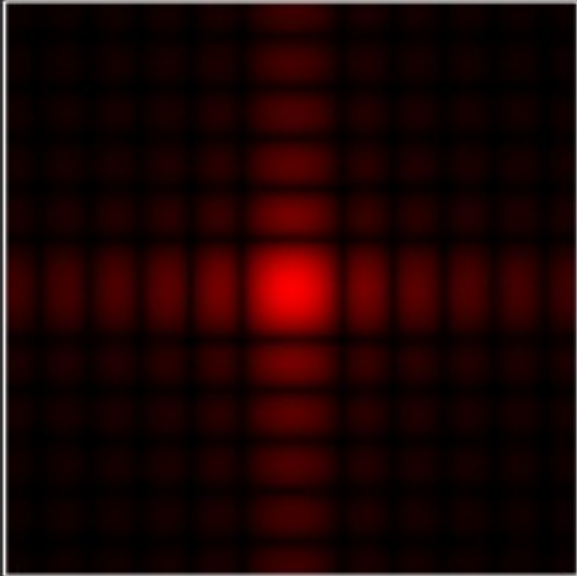
$\theta$  : angle de la zone perturbée en radian : rad  
 $\theta$  : angle de la zone perturbée en radian : rad  
 $\lambda$  : longueur d'onde de l'onde en m  
 $\lambda$  : longueur d'onde de l'onde en m  
 $a$  : largeur de l'ouverture en m.

est une constante qui ne dépend que de la figure géométrique de l'obstacle.  
 $k$  est une constante qui ne dépend que de la figure géométrique de l'obstacle.

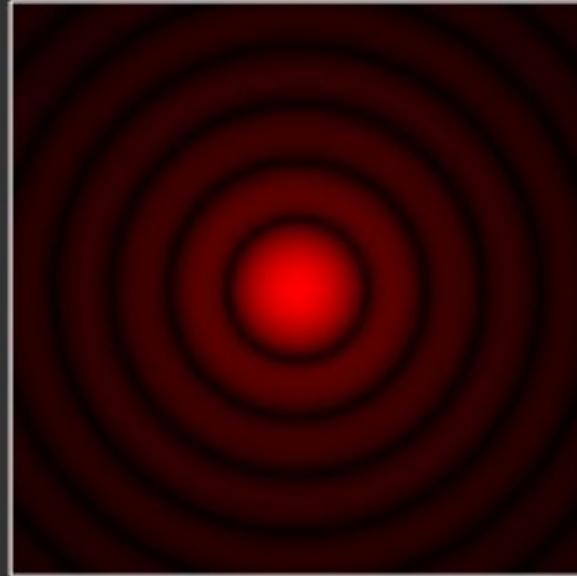
# Application : fentes d'Young



Diffraction par une  
ouverture carrée

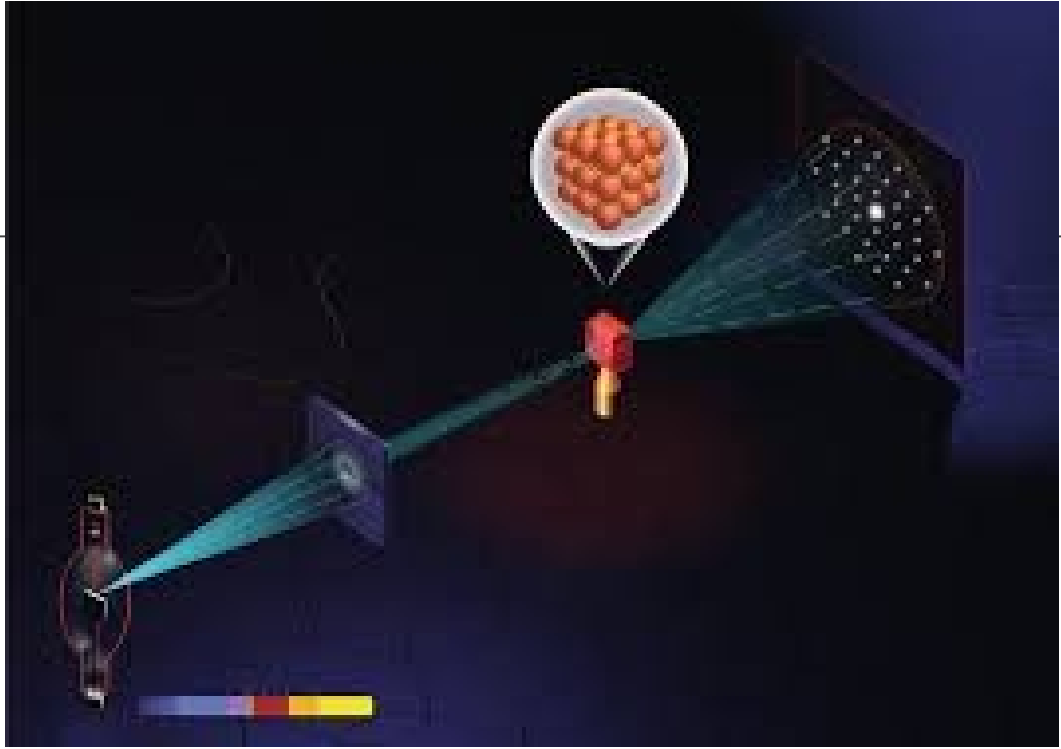
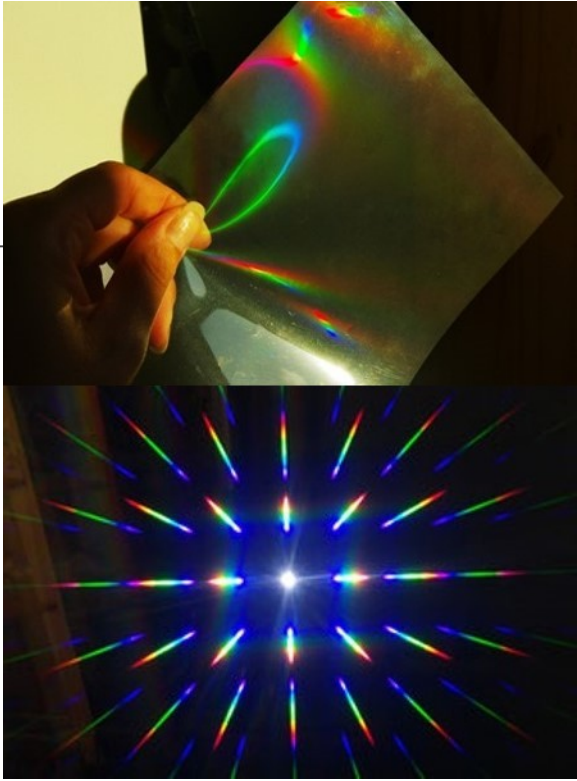


Diffraction par une  
ouverture circulaire



Diffraction par une double  
ouverture circulaire





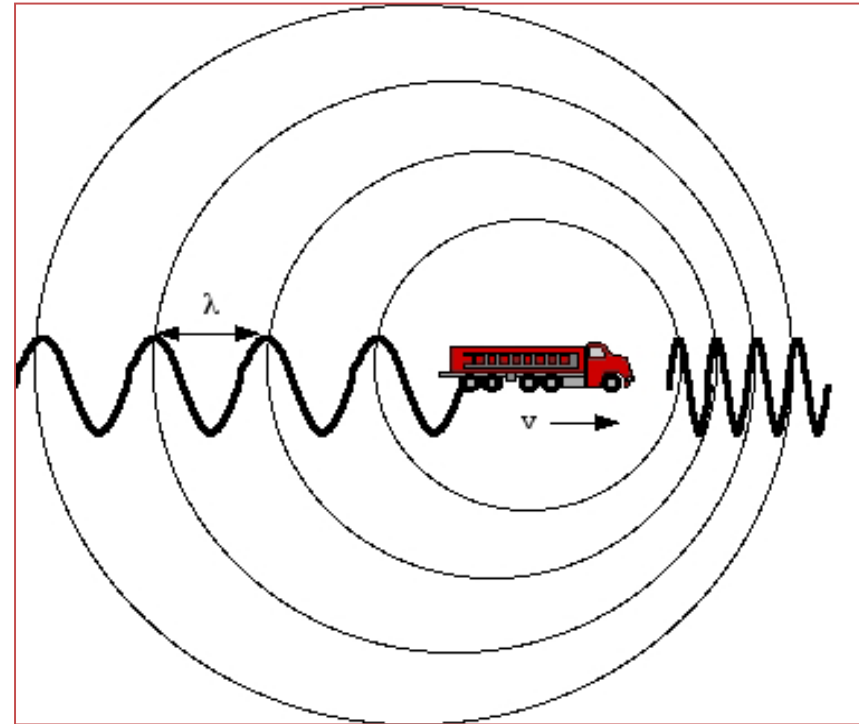
# Effet Doppler

Observation : enregistrement audio de l'avertisseur d'un véhicule en mouvement.

En s'approchant, le son **perçu** par un observateur fixe semble plus aigu, en s'éloignant il semble plus grave.

Le rapprochement relatif de la source et du récepteur fait augmenter la fréquence reçue (décalage vers les sons aigus).

L'éloignement relatif de la source et du récepteur fait diminuer la fréquence reçue (décalage vers les sons graves).





## Premier cas : principe du radar

### Première étape émetteur (E) fixe - Récepteur (voiture : V) mobile

L'émetteur envoie des ondes ultrasonores (célérité  $c$ ) en direction de la voiture en mouvement rectiligne et uniforme (vitesse  $v > 0$  si la voiture s'éloigne,  $< 0$  si elle se rapproche).

A l'instant  $t_1$ , E envoie un premier signal, V se situant à la distance  $d_1$ .

A l'instant  $t_2 = t_1 + T$ , E émet un deuxième signal ;

la voiture s'est alors déplacée de  $d_2 - d_1 = v.(t_2 - t_1)$ .

V reçoit le premier signal après une durée  $t'_1 - t_1 = [d_1 + v.(t'_1 - t_1)]/c$   
[distance  $d_1$  ajoutée de la distance parcourue par le son pendant  $t'_1 - t_1$ ]

V reçoit le second signal après une durée  $t'_2 - t_2 = [d_2 + v.(t'_2 - t_2)]/c$

En combinant ces deux relations et en notant  $t'_1 - t_1 = T$  et  $t'_2 - t_2 = T'$  on en déduit :  
 $T' - T = v.T' / c$

$$f' = f / (1+v/c). \begin{cases} f' < f \text{ si la voiture s'éloigne} \\ f' > f \text{ si la voiture se rapproche} \end{cases}$$

$$v = (f' - f) / f' . c$$

**Deuxième étape : la voiture réfléchit ce signal de fréquence  $f$  vers l'émetteur.** Nous nous retrouvons dans la même situation que précédemment  $c$ 'est-à-dire par rapport au référentiel voiture, le nouvel émetteur est fixe et le récepteur est en mouvement rectiligne et uniforme de même vitesse  $v$  et s'éloignant ou se rapprochant comme précédemment.

La formule établie peut être réinvestie :

$$f'' = f' / (1+v/c) = f / (1+v/c)^2 .$$

Si  $v / c \ll 1$  comme c'est le cas dans la situation étudiée dans notre montage ( $v \approx 6$  cm/s et  $c \approx 340$  m/s), nous pouvons écrire :

$$f'' \approx f.(1 - 2v/c)$$

$$v = \frac{f'' - f}{2f} . c \quad \text{soit} \quad v = \frac{\Delta f}{2f} . c$$

Deuxième cas : décalage en fréquence du son émis par un objet en mouvement rectiligne et uniforme (vitesse  $v$ ), le récepteur dans ce cas est immobile.

De la même façon, pour notre oreille fixe depuis que l'humanité a perdu quasiment la faculté génétique de les bouger, l'intervalle de temps entre deux fronts d'onde est inférieur ( respectivement ) supérieur à l'intervalle réel lors de l'émission , le deuxième front d'onde ayant moins ( resp. plus ) de distance à parcourir.

(Autre méthode) :  $V$  émet une onde ultra sonore dans le milieu de propagation, l'air. Cette onde est définie par une surpression dont l'expression est :

$p(x,t) = p_0 \cdot \cos[2\pi f(t - x/c)]$  ,  $x$  désignant la position par rapport au référentiel lié à la voiture. Par rapport au référentiel lié au récepteur, de vitesse  $v$  par rapport à la voiture, la position  $x'$  s'écrit :  $x' = x + v.t$ .

En reportant dans l'expression de la pression :

$$p(x',t) = p_0 \cdot \cos[2\pi f(1+v/c).(t-x'/(c+V))]$$

On met en évidence : la fréquence de l'onde perçue par notre oreille :  $f' = f/(1+v/c)$  ;

(On retrouve  $v > 0$  ( resp.  $v < 0$  ) le voiture s'éloigne ( resp. se rapproche )

et le son devient plus grave ( resp. aigu ).

la célérité du son dans le référentiel du récepteur en accord avec la loi de composition des mouvements :  $c' = c + v$ .

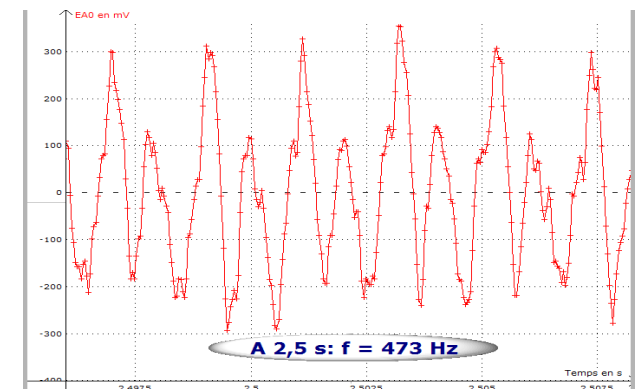
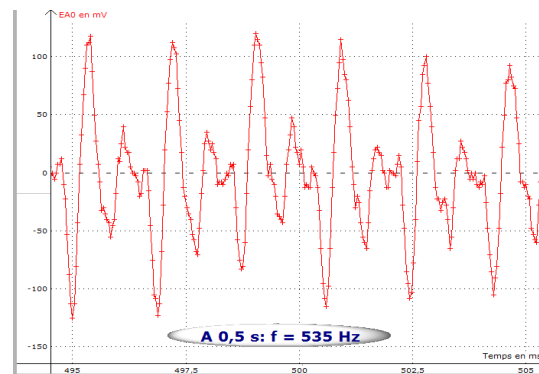
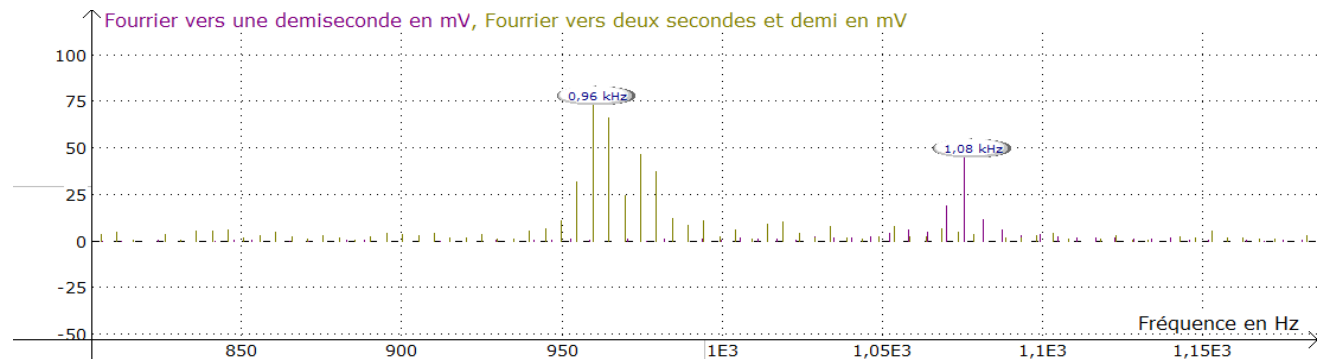
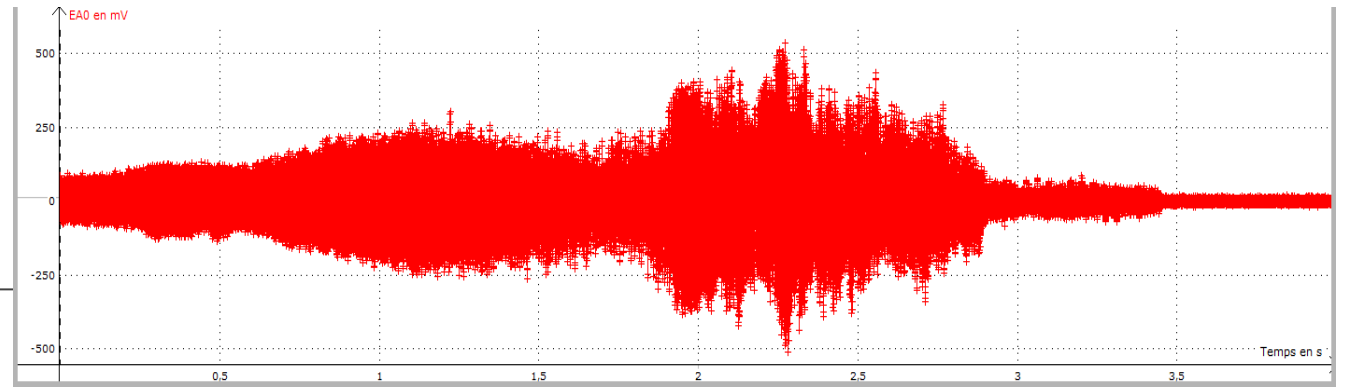
On en déduit : 
$$v = \frac{f-f'}{f} \cdot c = \frac{-\Delta f}{f} \cdot c.$$

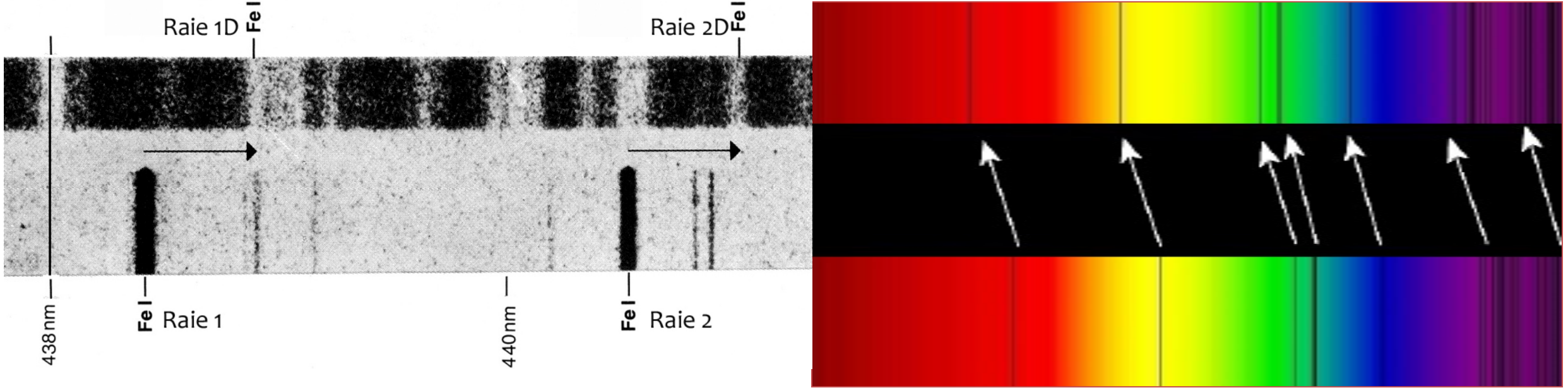
Un enregistrement **sonore** d'un véhicule klaxonnant de façon permanente a été effectué lors du passage devant un micro.

L'enregistrement sonore est capturé pendant 3,5 s avec la carte SYSAM et analysé avec le logiciel de traitement de données associé LATISPRO.

Par un grossissement du graphe, deux parties sont étudiées, l'une lorsque le véhicule se rapproche du micro au temps 0,5 s, l'autre lorsque le véhicule s'en éloigne au temps 2,5s. La fréquence du son est calculée dans les deux cas en mesurant la durée de 5 périodes.

Calculer la vitesse du véhicule en admettant la relation .





- L'éloignement de l'astre a pour effet un décalage de la longueur vers des valeurs plus grandes (vers le rouge) et une diminution de la fréquence.
  - Les deux raies du fer identifiées sont décalées vers de plus grandes valeurs : l'étoile s'éloigne.
  - *Redshift* : déplacement vers les rouges.
  - $v/c = (438,9 - 438,4) / 438,4 = 1,1 \cdot 10^{-3}$  : donc  $v \ll c$ .
  - De la mesure précédente, nous en déduisons  $v = 3,1 \cdot 10^5 \text{ m.s}^{-1}$ .
  - Ces mesures permettent de vérifier la théorie du *big bang* : en effet, lors de l'explosion originelle, un rayonnement très énergétique et de faible longueur d'onde a été émis. Très rapidement l'univers s'est dilaté ( $\approx 10^{21} \text{ m}$ ) donc le rayonnement reçu a mis 14 milliard d'année pour se propager et nous parvenir mais de plus, sa longueur d'onde s'est décalé vers les plus grandes valeurs, et nous parviennent dans le domaine des ondes radios : on les observe avec la « neige » sur l'écran d'une télé.
  - Loi de Hubble : comme un élastique, plus lointaine est l'étoile, plus sa vitesse est élevée (plus on éloigne un point de sa position d'équilibre, plus il est « facile » de l'éloigner encore plus).
- La mesure comme précédemment de la vitesse d'une étoile, permet d'en déduire son éloignement.