

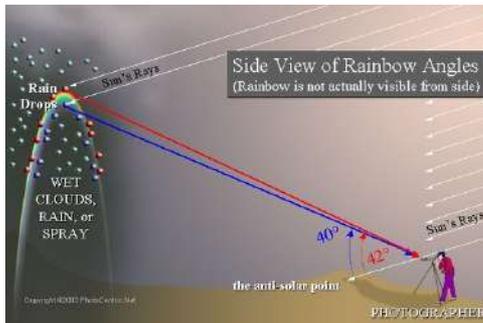


Physique pour Tous !

Site web : <http://physiquepourtous.unistra.fr>
Mail: physiquepourtous@unistra.fr

Résumé du 1^{er} cours

- Nous avons traité de la lumière visible et de notre vision. Nous avons constaté que
 - les couleurs sont des interprétations subjectives de la longueur d'onde de la lumière
 - L'œil perçoit l'angle d'arrivée de la lumière et sa couleur à l'instant où elle arrive... Ce qui ne présage pas de l'histoire de la lumière depuis son point d'émission.
- Divers phénomènes naturels et illusions d'optique ont été expliqués



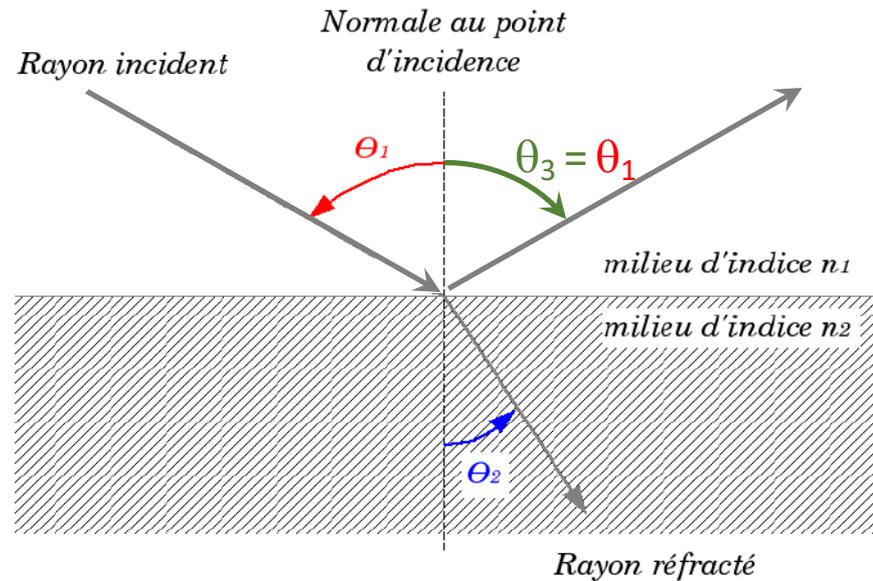
Résumé du 1^{er} cours

- Une grande partie du cours était basée sur la déviation de la lumière dans les matériaux. Déviation liée à l'indice de réfraction « n » des matériaux.

- $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

- Si θ_1, θ_2 petits

→ $n_1 \theta_1 \sim n_2 \theta_2$



Résumé du 1^{er} cours

- Une grande partie du cours était basée sur la déviation de la lumière dans les matériaux. Déviation liée à l'indice de réfraction « n » des matériaux.
- Cet indice est défini comme
 - $n = c/v$
 - c = vitesse de la lumière dans le vide
 - v = vitesse de la lumière dans le matériau
- Il dépend du matériau et de la longueur d'onde de la lumière...
 - Une question a été soulevée: « Pourquoi « n » dépend-il de la longueur d'onde? ».
 - La réponse à cette question fera l'objet d'une...

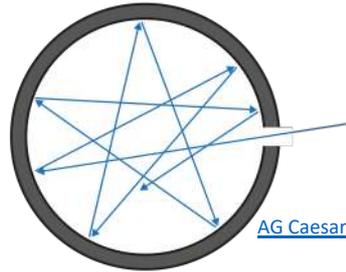
PISTE ROUGE

Résumé du 2^{ème} cours

- Nous avons discuté comment élargir notre perception du monde en améliorant les sources de lumière et notre connaissance des interactions lumière - matière.

- En chemin, nous avons aperçu :

- Le modèle du « corps noir », absorbant et émettant parfaitement.

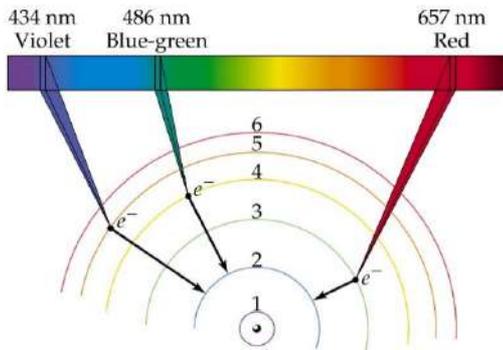


[AG Caesar https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body_realization.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body_realization.svg)

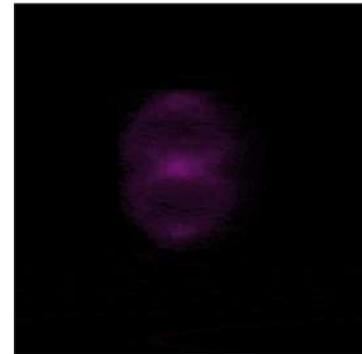
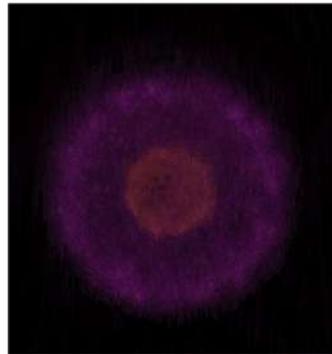
- L'**Hypothèse révolutionnaire de Planck** en décembre 1900: l'énergie d'une onde ne peut pas prendre n'importe quelle valeur, elle doit être un multiple de **$E_0 = hc/\lambda (=h\nu)$**

Résumé du 2^{ème} cours

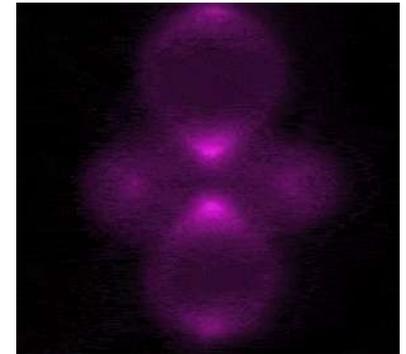
- Nous avons discuté comment élargir notre perception du monde en améliorant les sources de lumière et notre connaissance des interactions lumière - matière.
- En chemin, nous avons aperçu :
 - Deux modèles d'atome : « l'ancien » et « un nouveau »



Modèle de Bohr

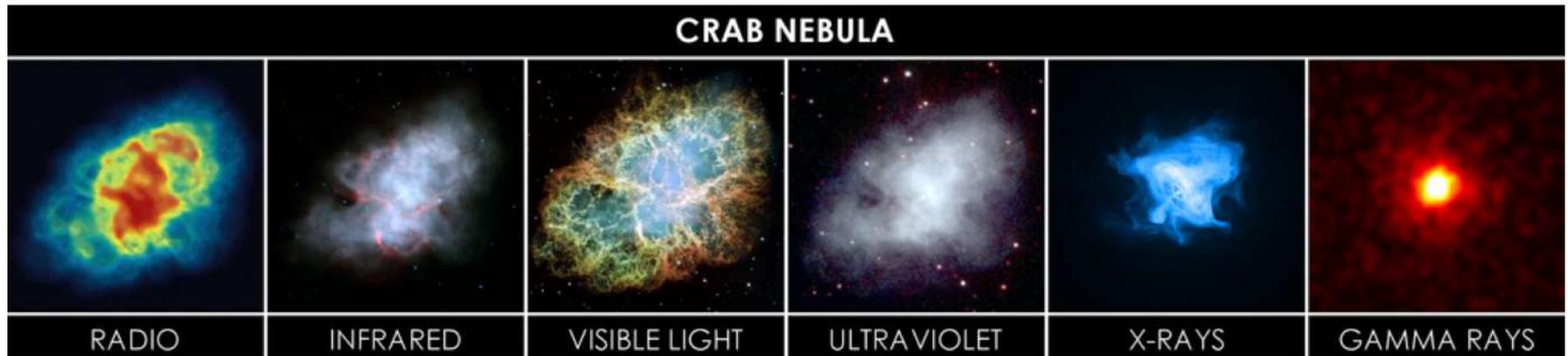
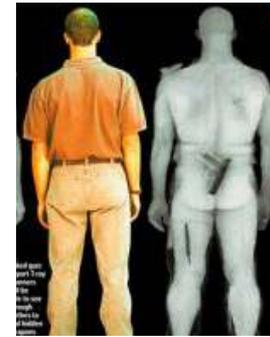


Modèle « probabiliste »



Résumé du 2^{ème} cours

- Nous avons montré quelques images obtenues avec ces longueurs d'onde situées hors de la gamme visible.



The crab nebula in radio, infrared, visible, ultraviolet, x-ray and gamma-ray wavelengths.

Sources: Radio: NRAO/AUI and M. Bietenholz, J.M. Uson, T.J. Cornwell; Infrared: NASA/JPL-Caltech/R. Gehrz (University of Minnesota); Visible: NASA, ESA, J. Hester and A.Loll (Arizona State University); Ultraviolet: NASA/Swift/E. Hoversten, PSU, X-ray: NASA/CXC/SAO/F. Seward et al.; Gamma: NASA/DOE/Fermi LAT/R. Buehler

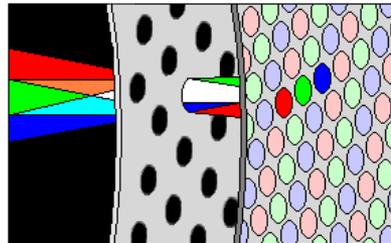
Résumé du 2^{ème} cours

Par ailleurs, connaître la façon dont les ondes sont absorbées, émises, diffusées ou réfléchies accroît notre capacité :

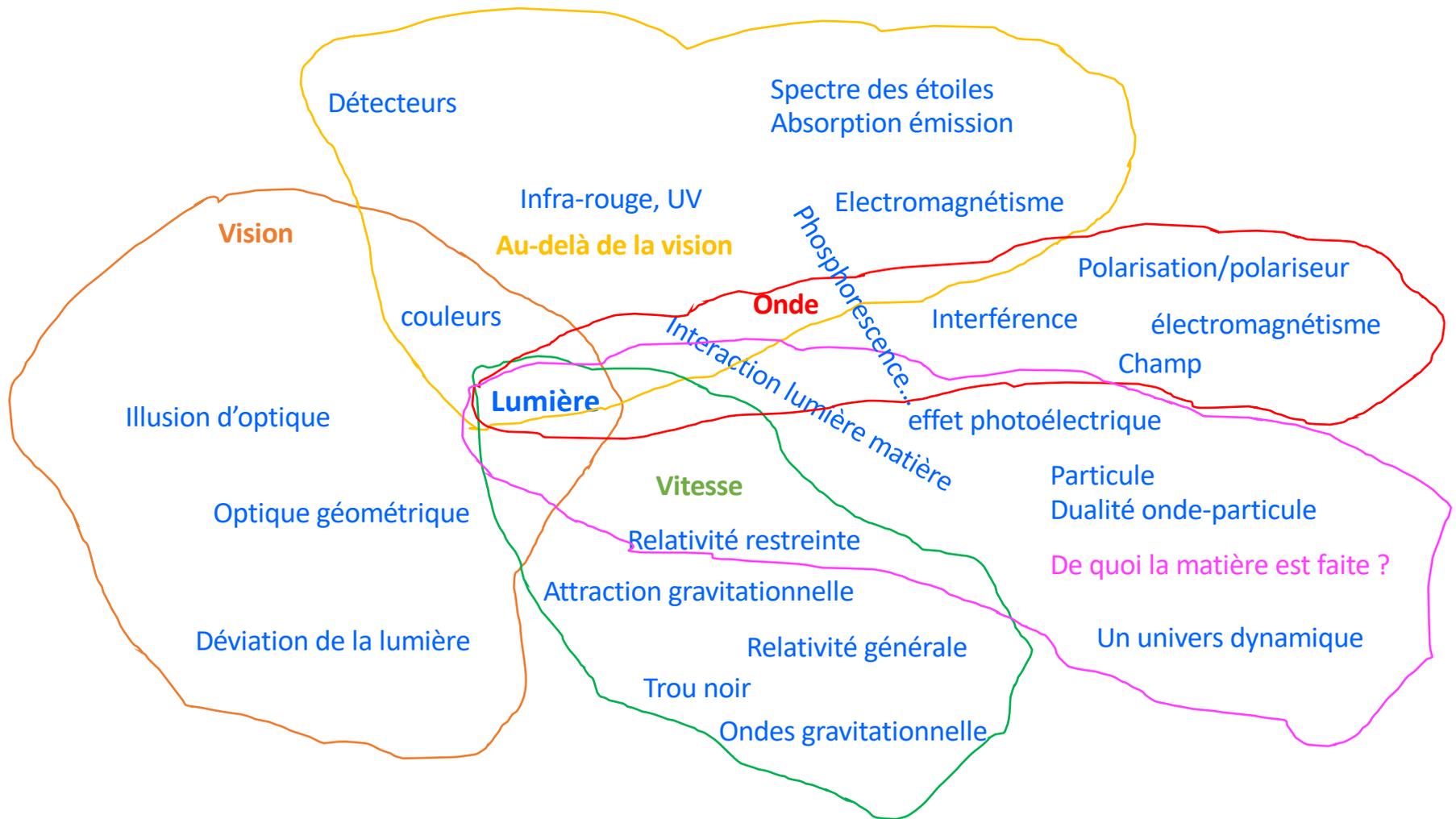
- d'analyse des informations que nous recevons,
- et de production technologique



Découverte du calystène

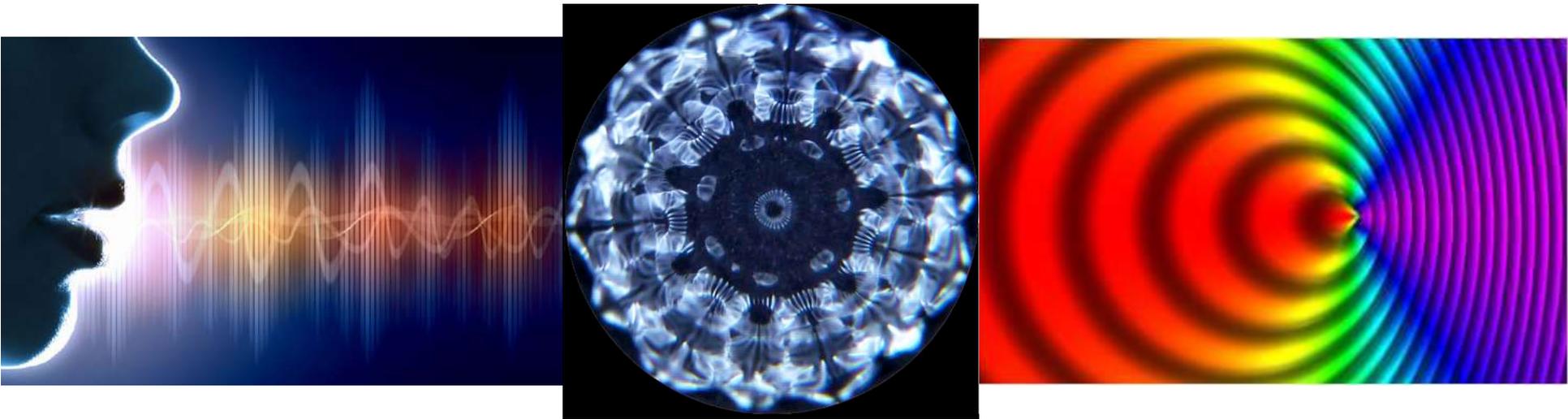


Mon nuage de mots



Cours 3 – Ondes et lumière

Réflexions & Expérimentations Ondulatoires



Mardi 07 Mai – Amphi. Fresnel (Institut de Physique)

18h30 → 20h - Ouvert à tous, entrée libre & gratuite

But et plan de ce cours

- Comprendre les caractéristiques des ondes
 - Généralités sur les ondes
 - Propagation
 - Oscillation et résonance
 - Polarisation
 - Effet Doppler

Voir aussi le cours de Eric Chabert avec un point de vue différent

http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2018/12/Cours5_vpublic-compressed.pdf

Généralités sur les ondes

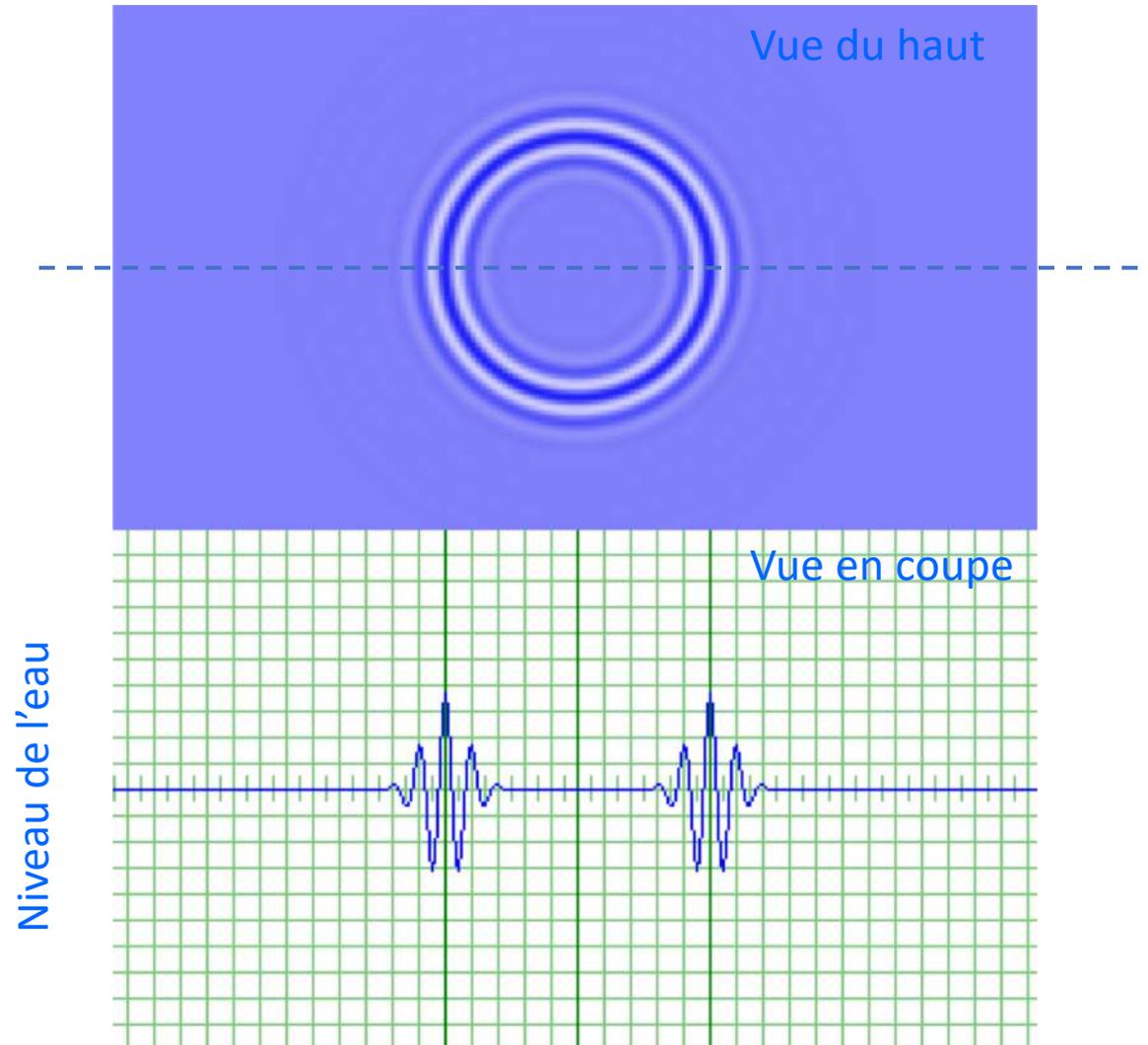
- Onde: propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés locales. Elle transporte de l'énergie sans transporter de matière.



A la surface de l'eau



- Circulaire



A la surface de l'eau

- Mascaret

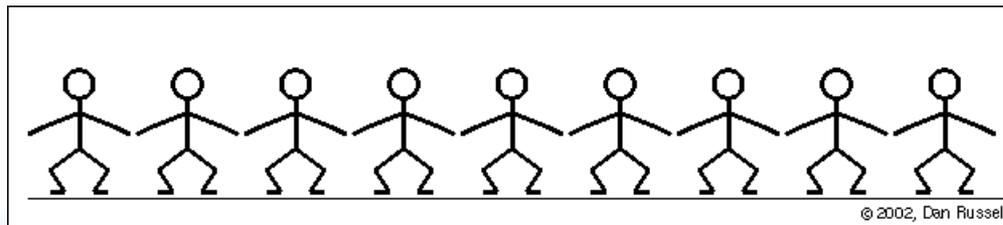


A la surface de l'eau

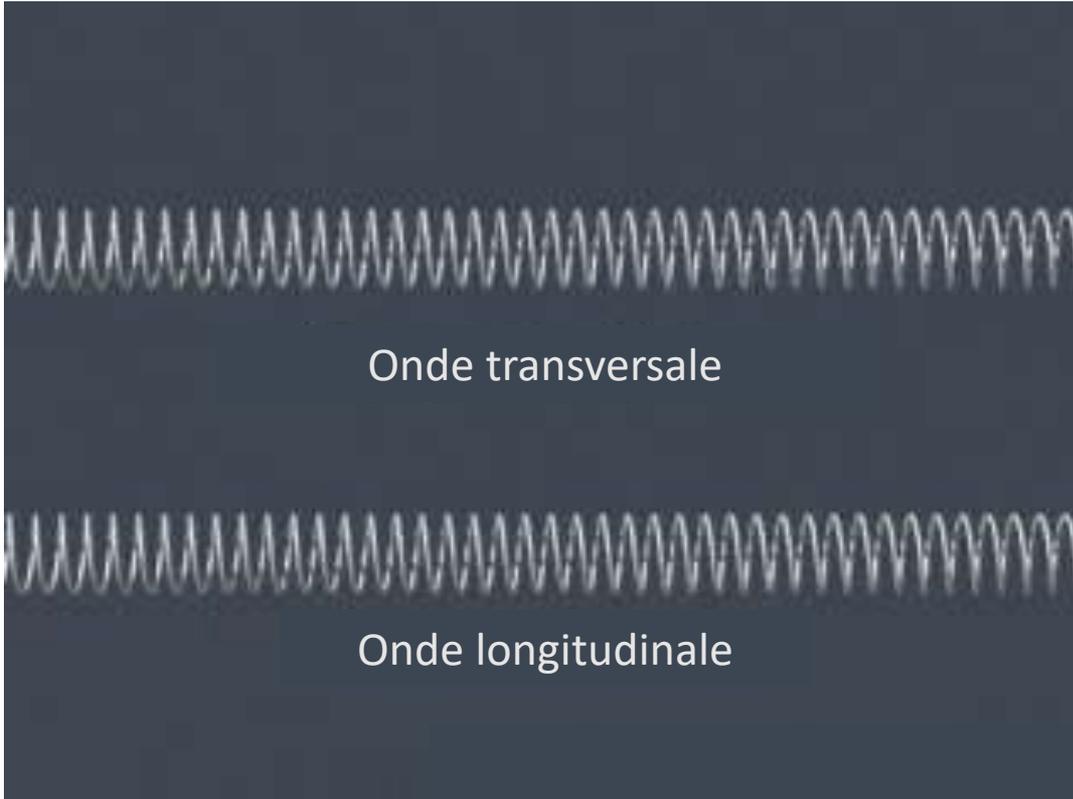
- Houle croisée près de l'île de Ré



A la surface d'un stade



Ondes dans un ressort



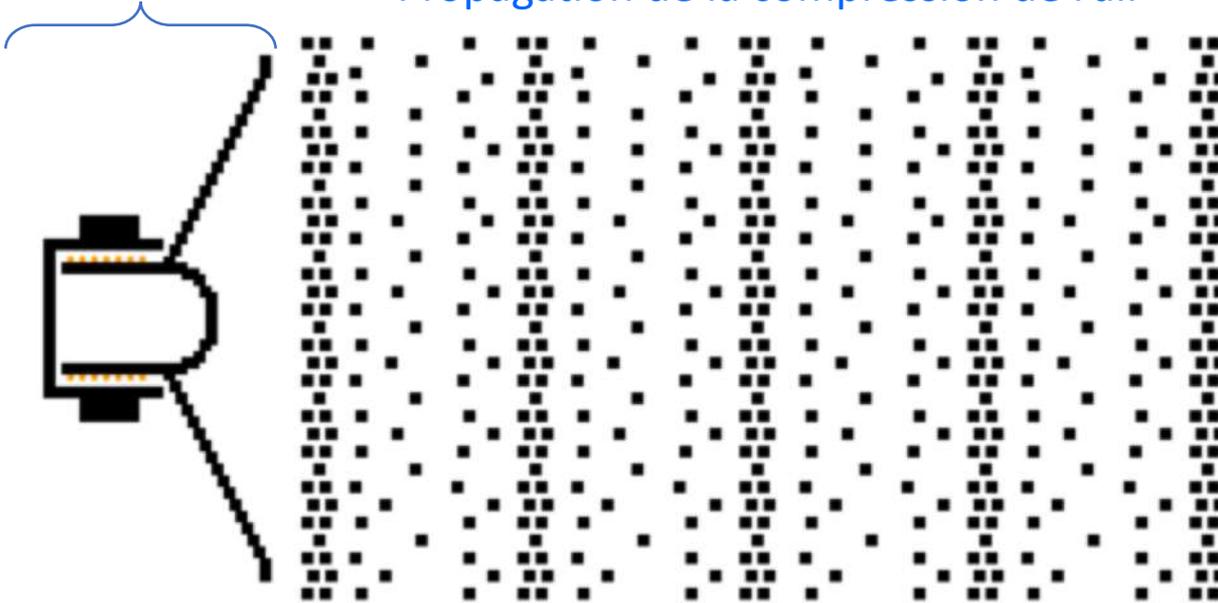
Déformation perpendiculaire
à la propagation

Déformation parallèle
à la propagation

Ondes sonores

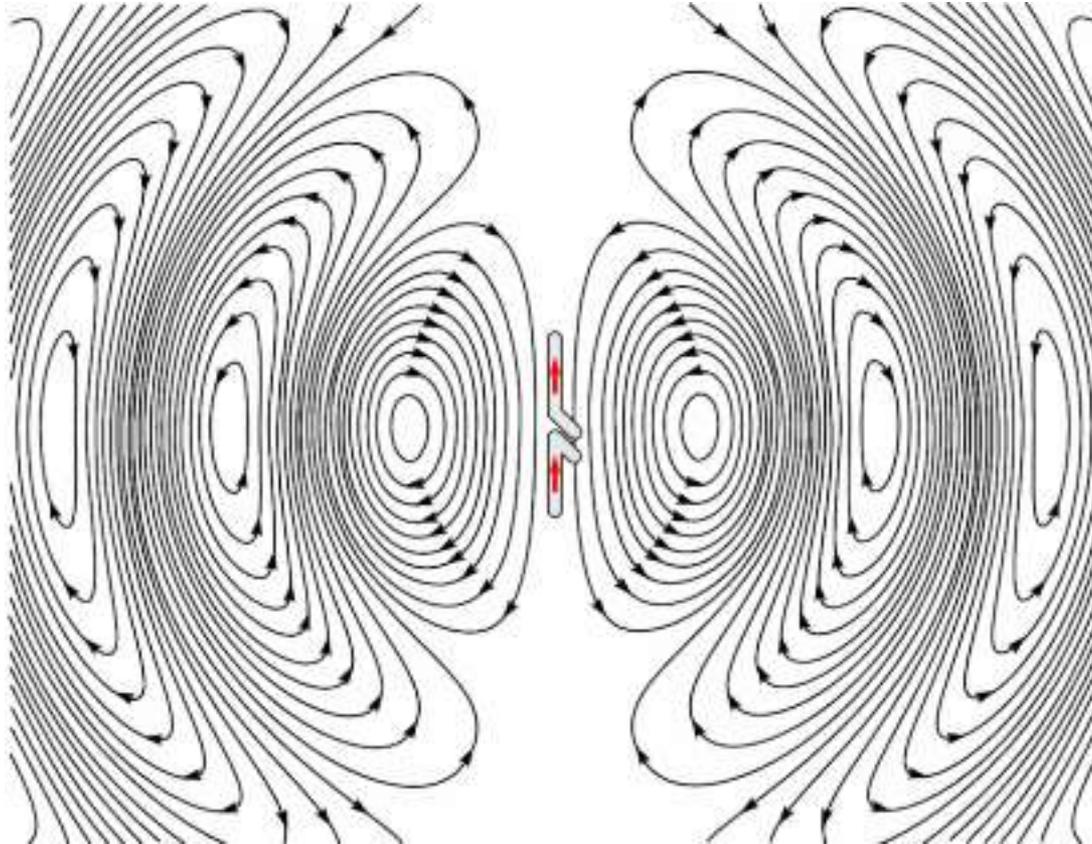
Haut-parleur

Propagation de la compression de l'air



Ondes électromagnétiques

- Produites par une antenne radio



Ondes électromagnétiques

- Produites par une supernovæ

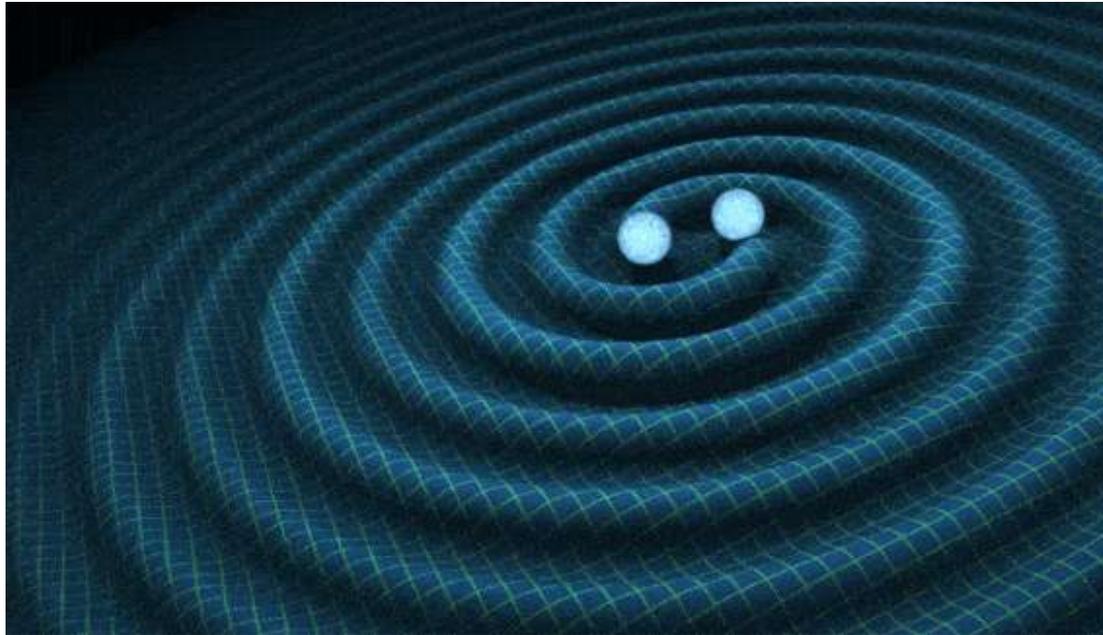


The crab nebula in radio, infrared, visible, ultraviolet, x-ray and gamma-ray wavelengths.

Sources: Radio: NRAO/AUI and M. Bietenholz, J.M. Uson, T.J. Cornwell; Infrared: NASA/JPL-Caltech/R. Gehrz (University of Minnesota); Visible: NASA, ESA, J. Hester and A.Loll (Arizona State University); Ultraviolet: NASA/Swift/E. Hoversten, PSU, X-ray: NASA/CXC/SAO/F. Seward et al.; Gamma: NASA/DOE/Fermi LAT/R. Buehler

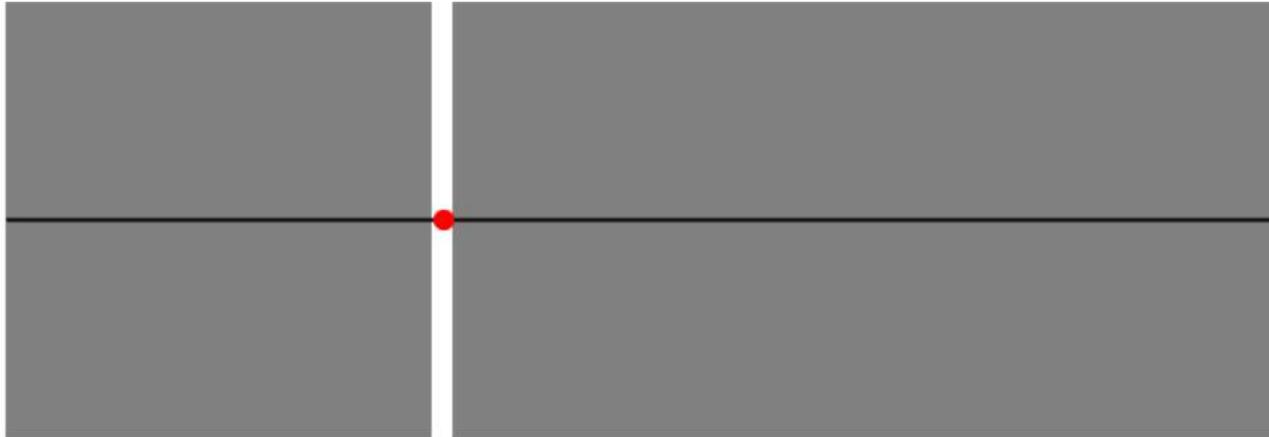
Ondes gravitationnelles

- Produites par des objets massifs en rotation

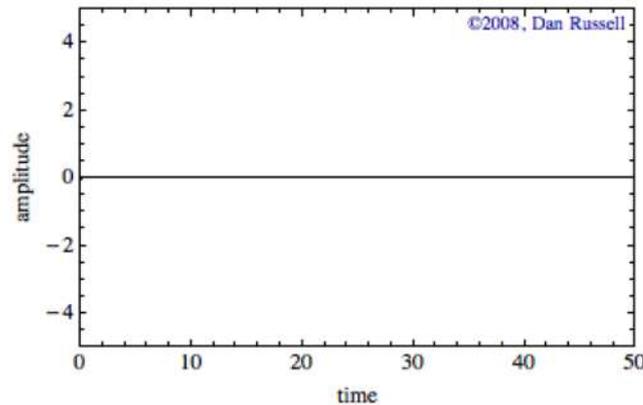


Propagation d'une onde

- Sur fond gris, le mouvement de l'onde

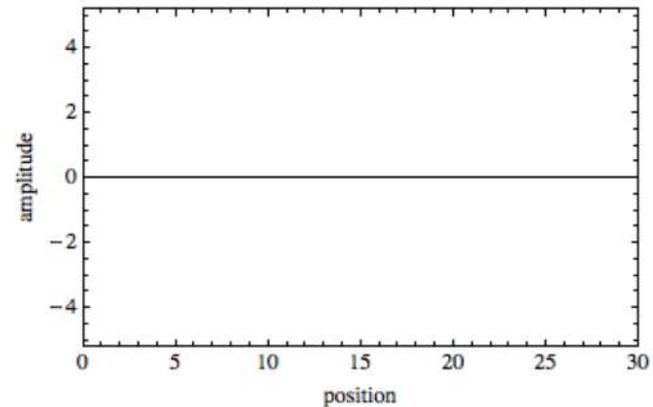


Time behavior at $x=10.25$



Description temporelle
Position fixe

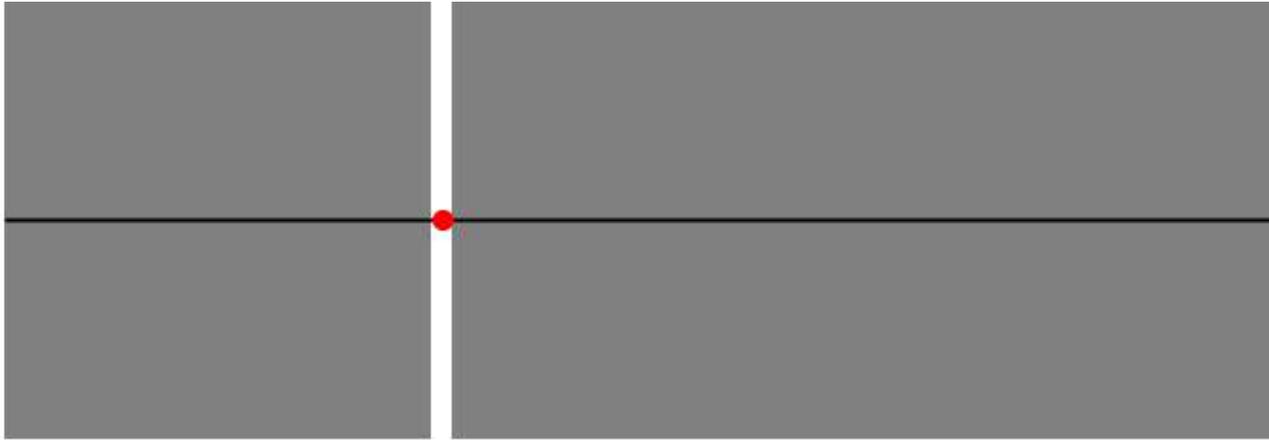
Snapshot of wave at $t=27s$



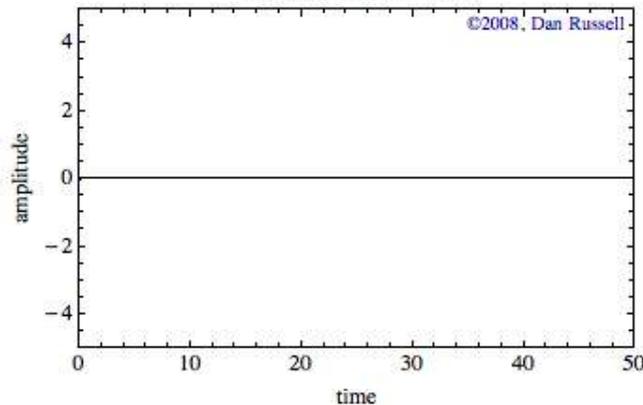
Description spatiale
Temps fixe

Propagation d'une onde

- Sur fond gris, le mouvement de l'onde

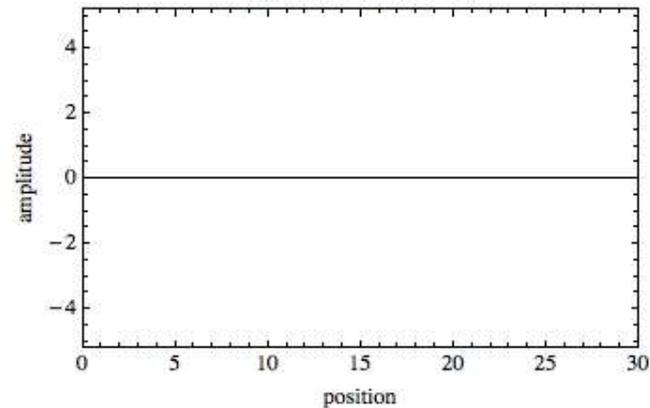


Time behavior at $x=10.25$



Description temporelle
Position fixe

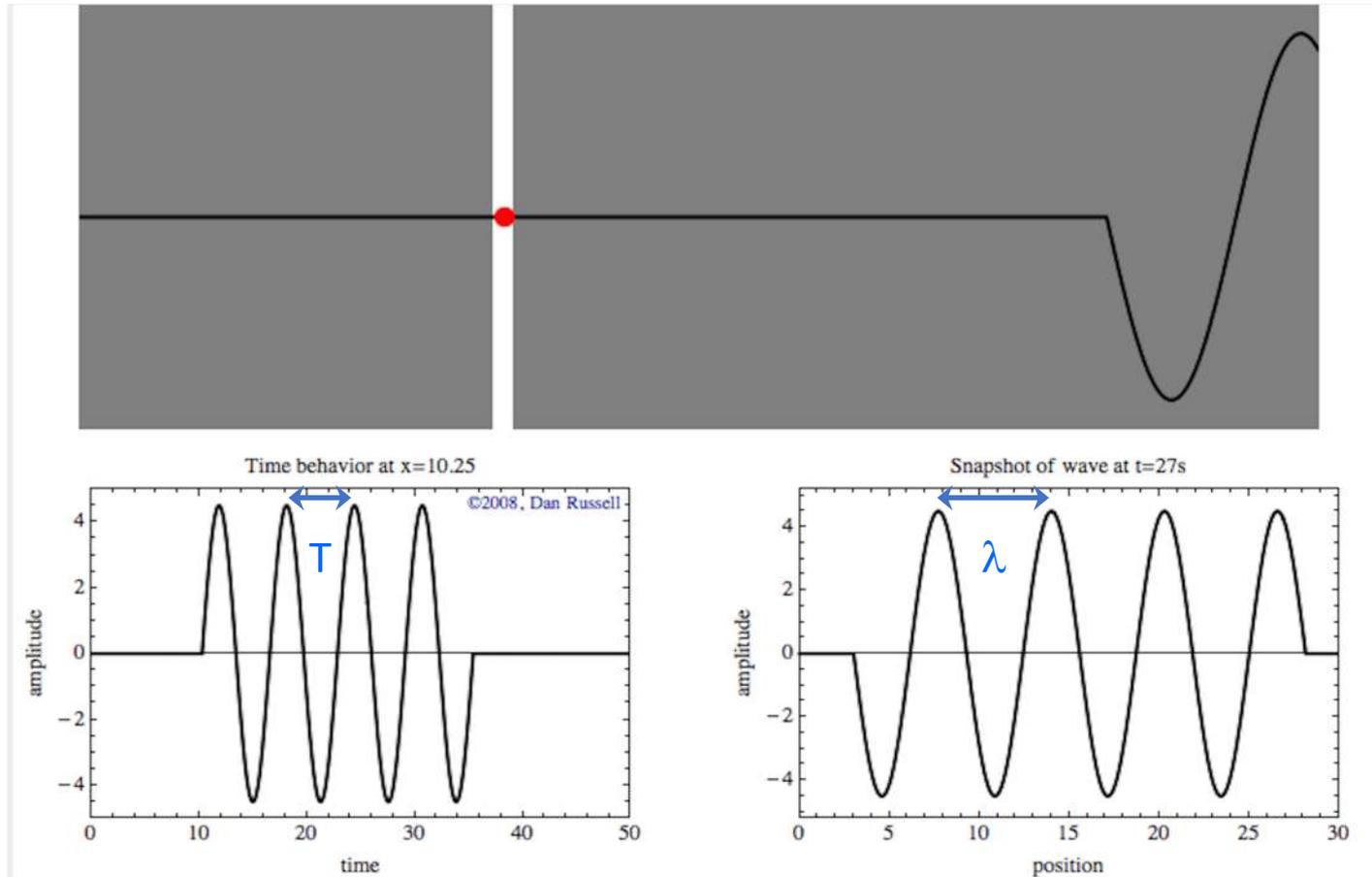
Snapshot of wave at $t=27s$



Description spatiale
Temps fixe

Propagation d'une onde

- Sur fond gris, le mouvement de l'onde



Description temporelle
Position fixe

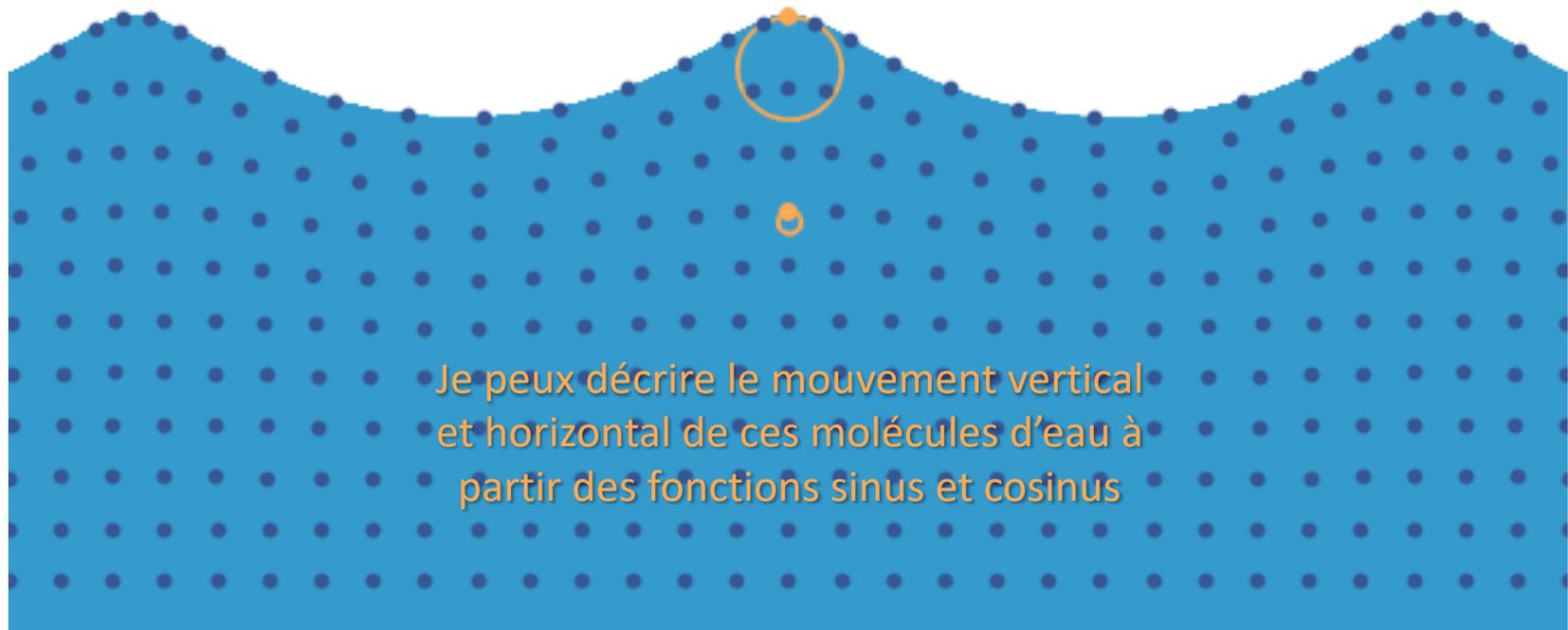
Description spatiale
Temps fixe

$$v = \lambda/T$$

Propagation

- Les ondes se propagent de proche en proche, par déformation d'un matériau ou dans le vide

©2016, Dan Russell

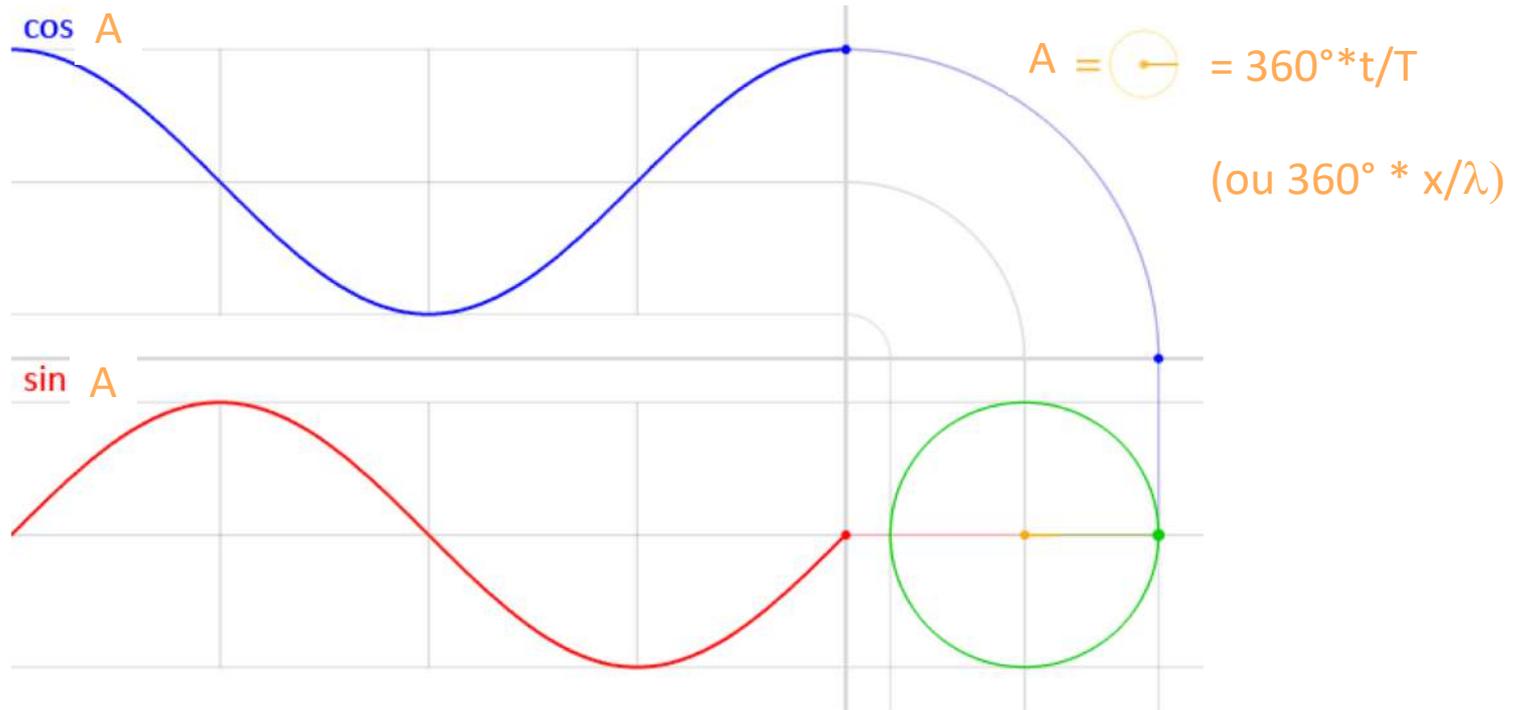


Les molécules d'eau restent quasiment sur place
(deux exemples en orange)

L'oscillation progresse vers la droite

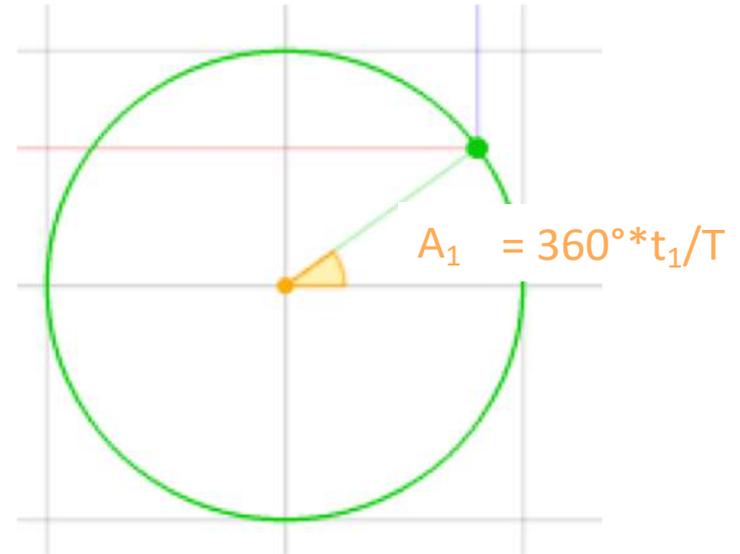
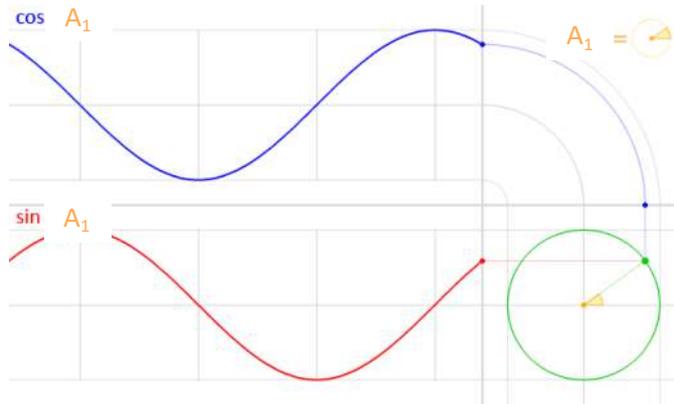
Fonctions très utiles

- Les fonctions sinus et cosinus



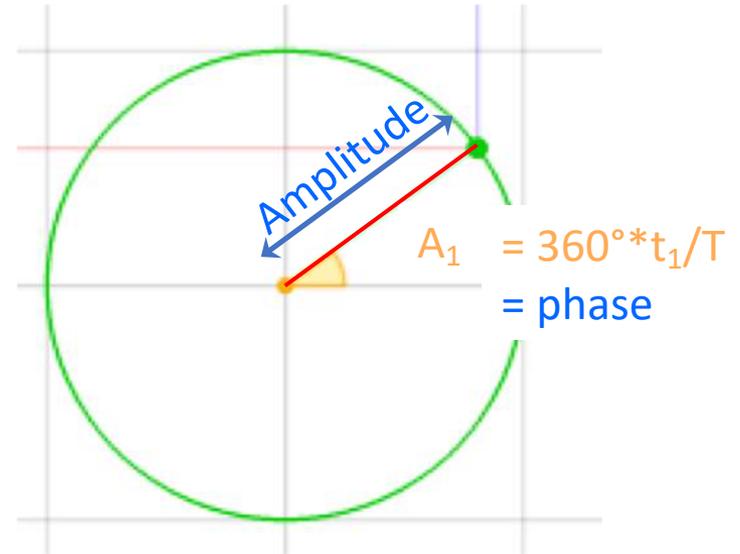
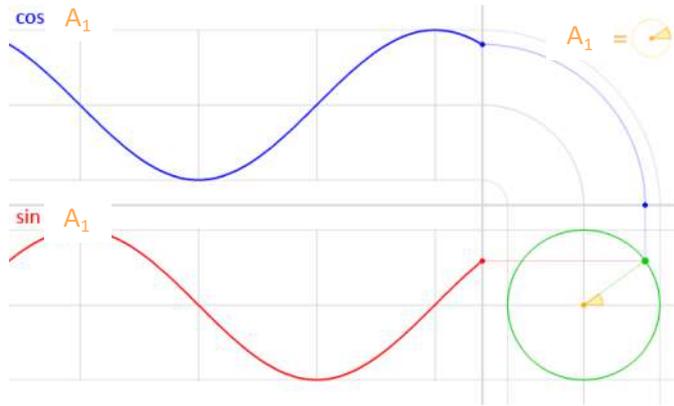
Représentation graphique

- Vecteur de Fresnel



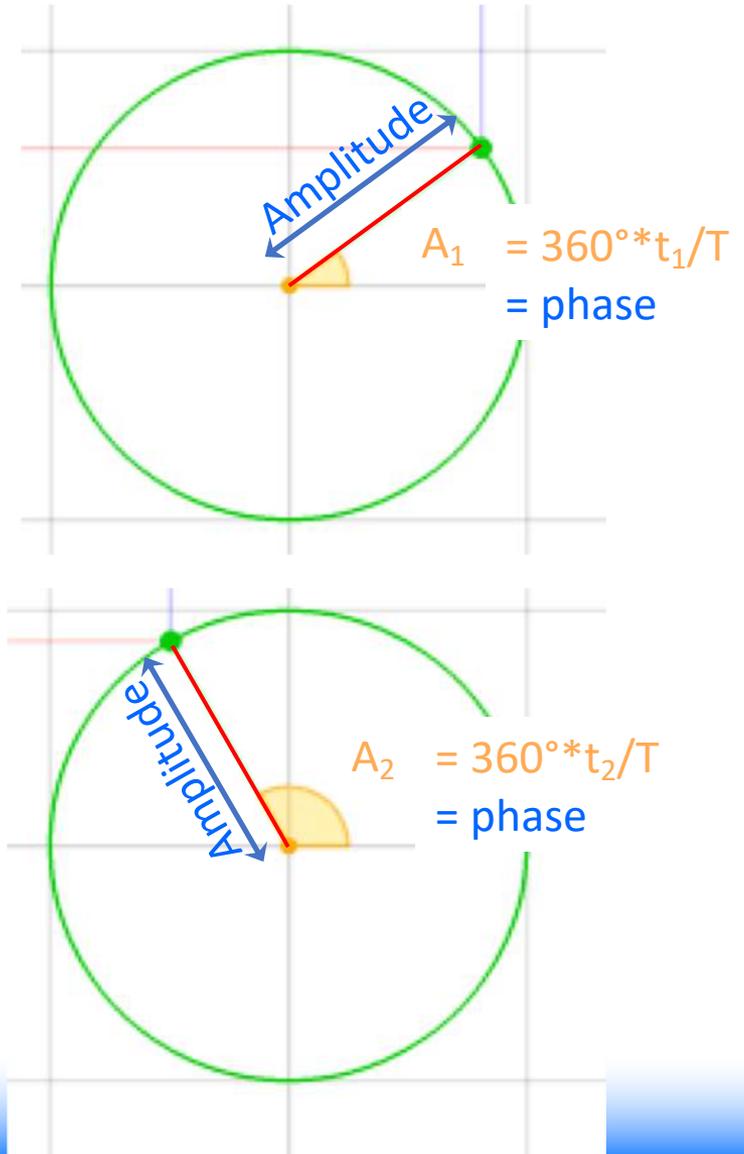
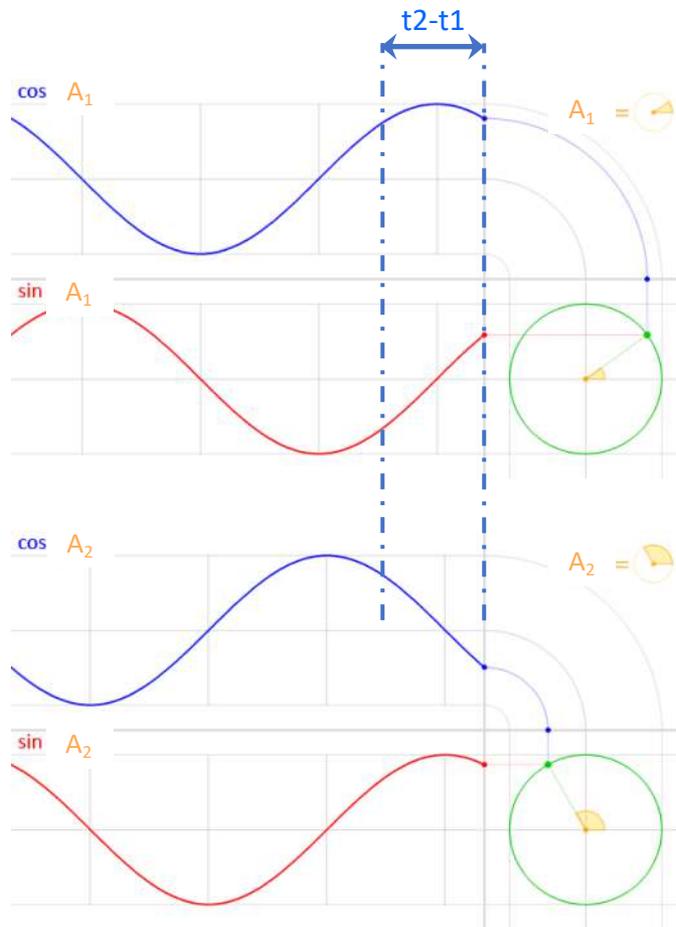
Représentation graphique

- Vecteur de Fresnel



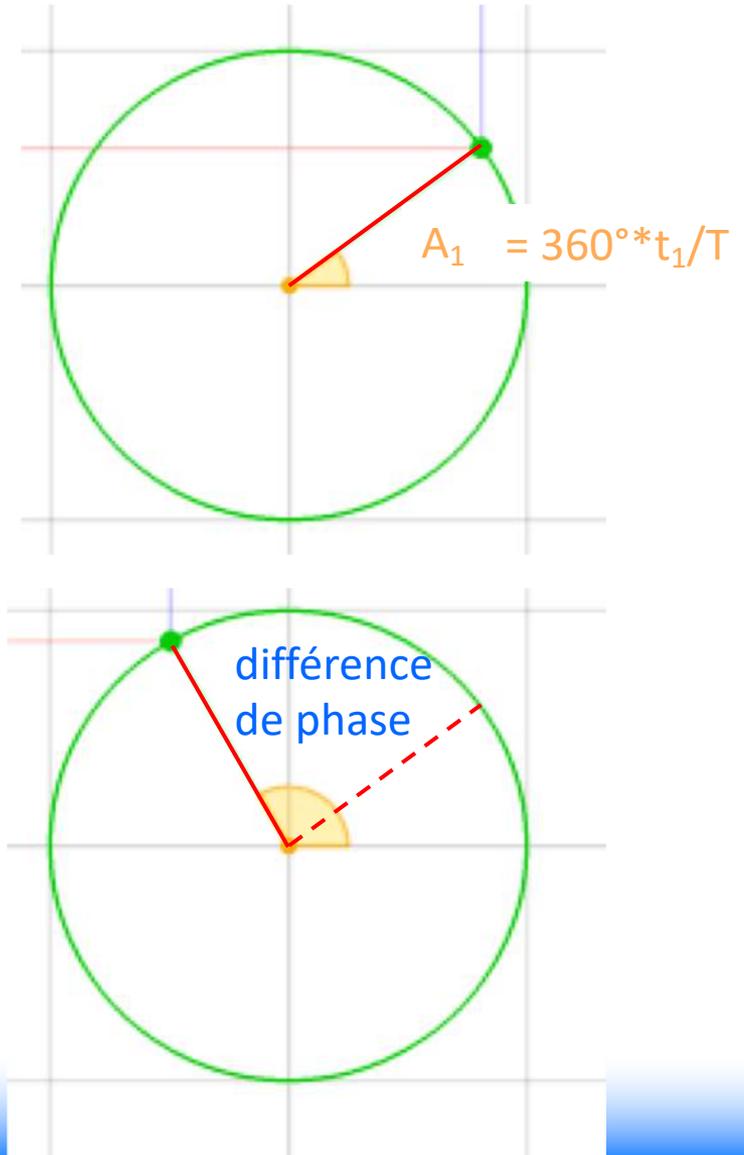
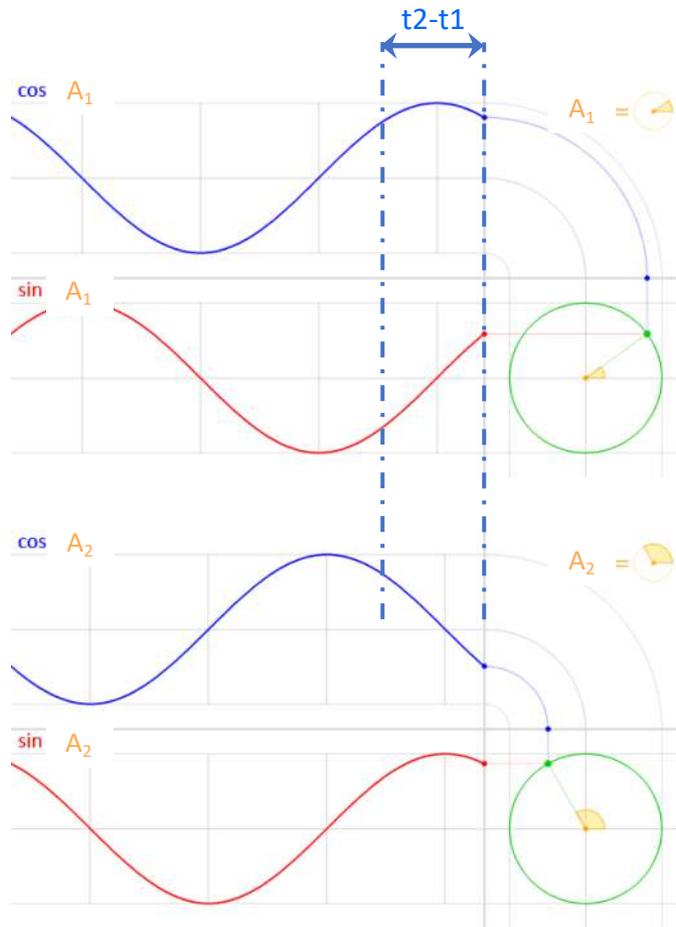
Représentation graphique

- Vecteur de Fresnel



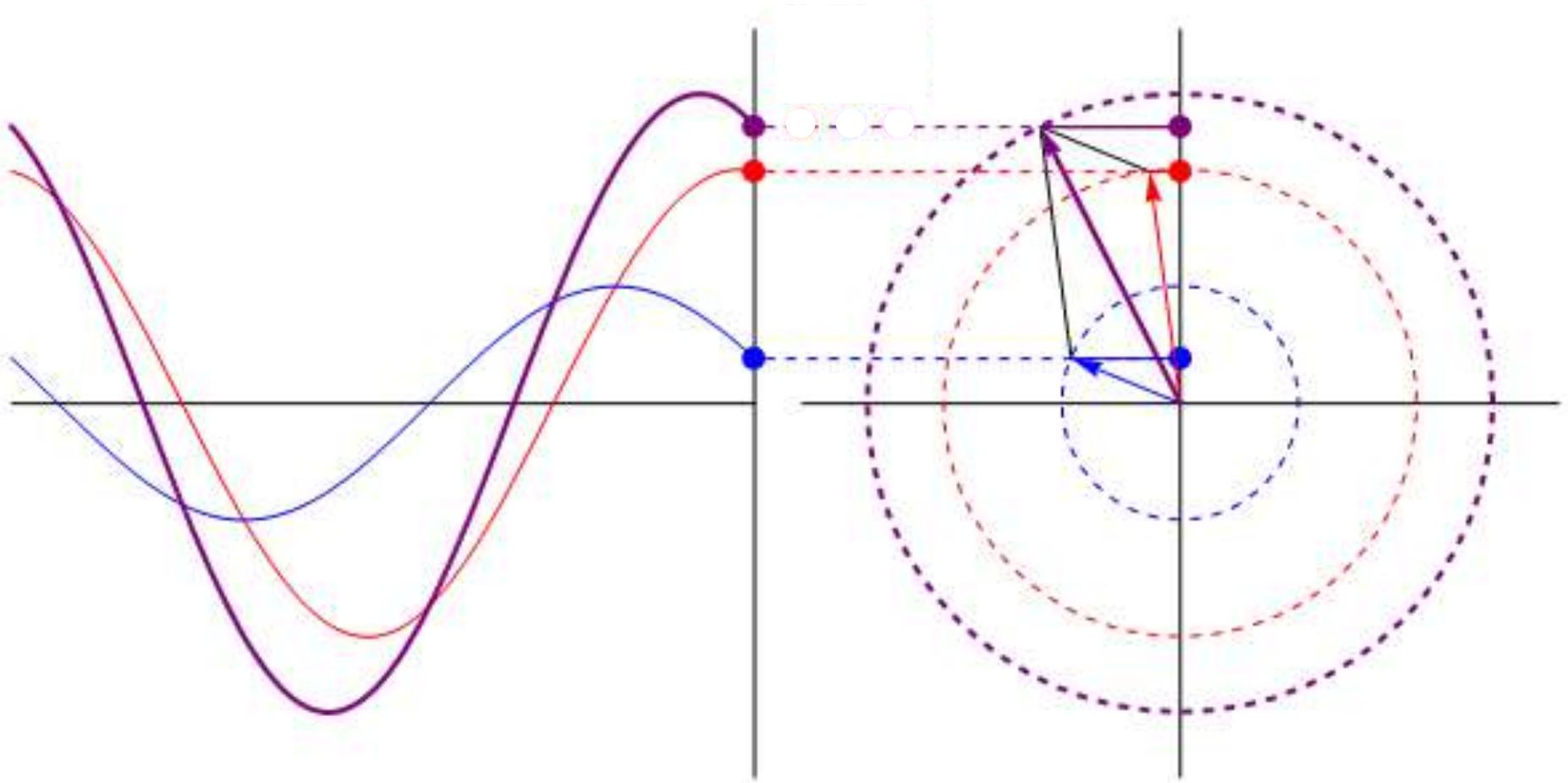
Représentation graphique

- Vecteur de Fresnel



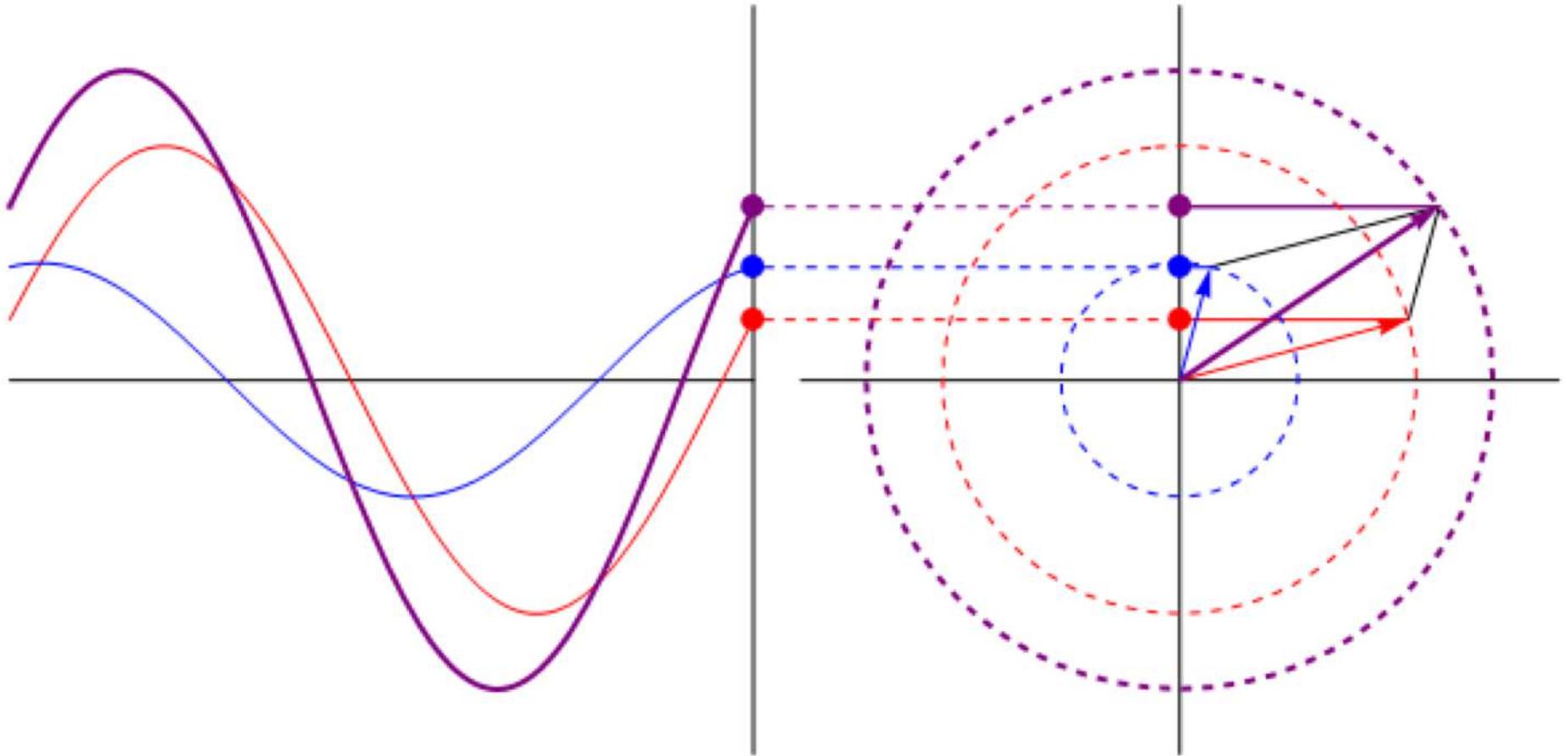
Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

Mêmes fréquences
Légère différence de phase



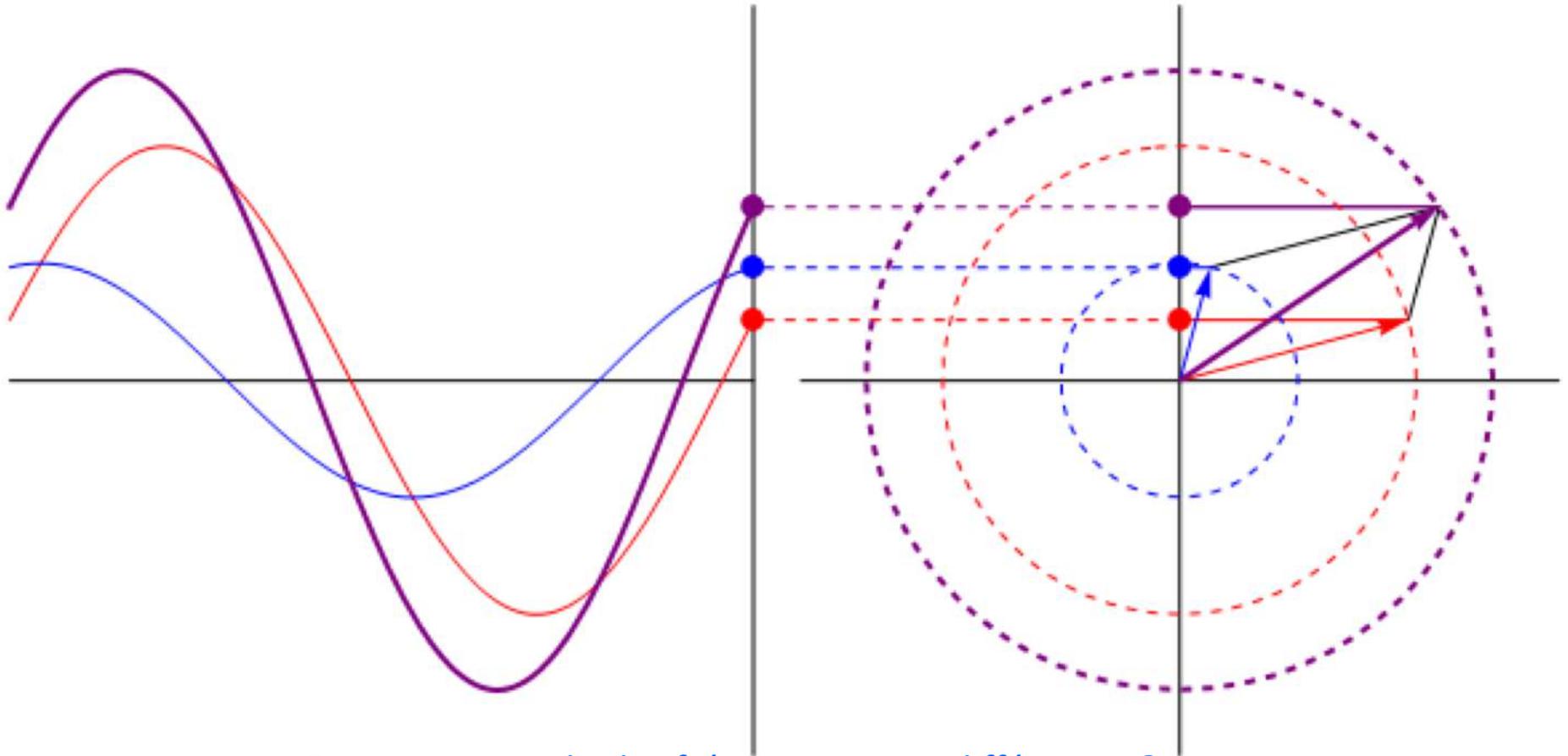
Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

Mêmes fréquences
Légère différence de phase



Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

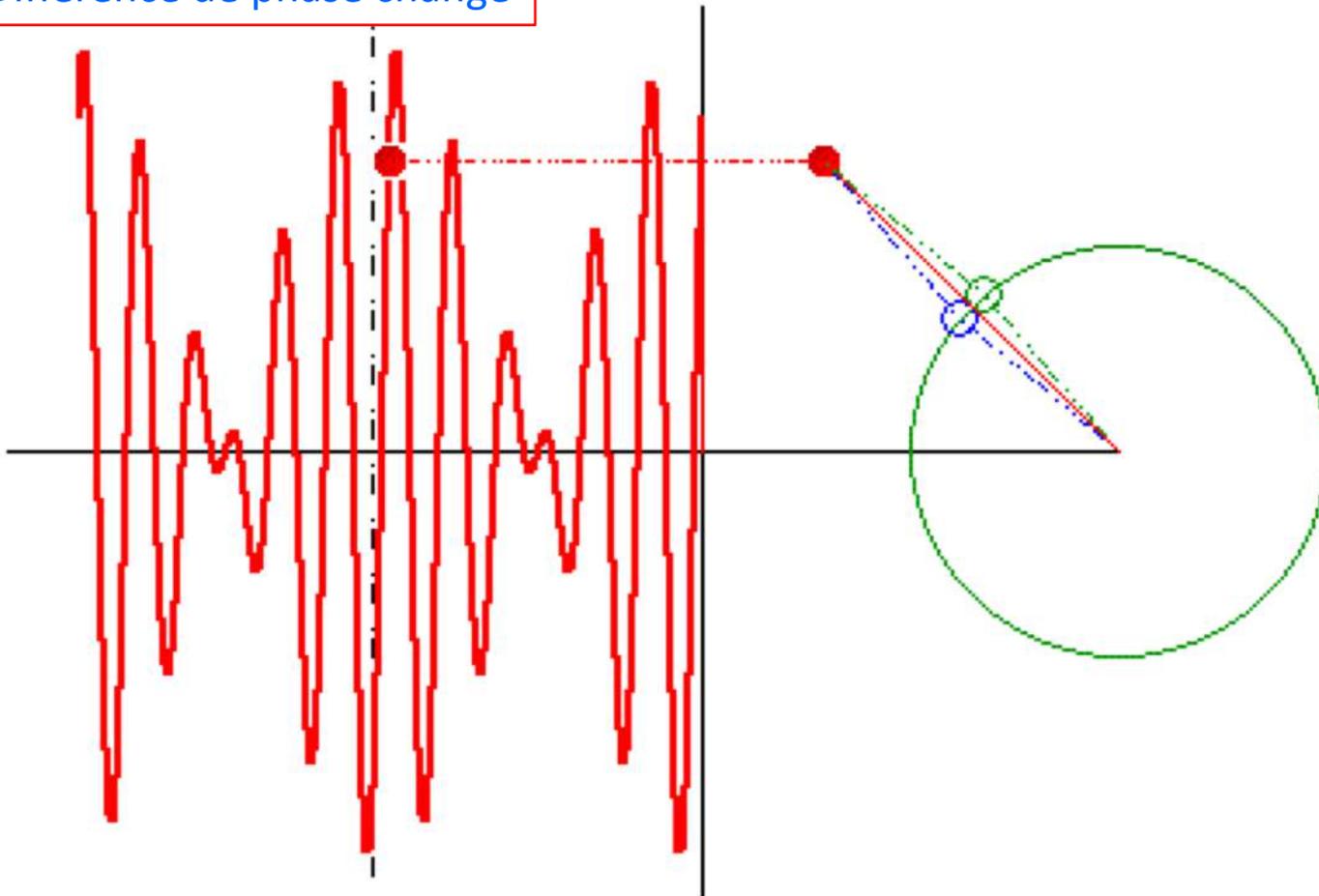
Mêmes fréquences
Légère différence de phase



Que se passe-t-il si les fréquences sont différentes ?

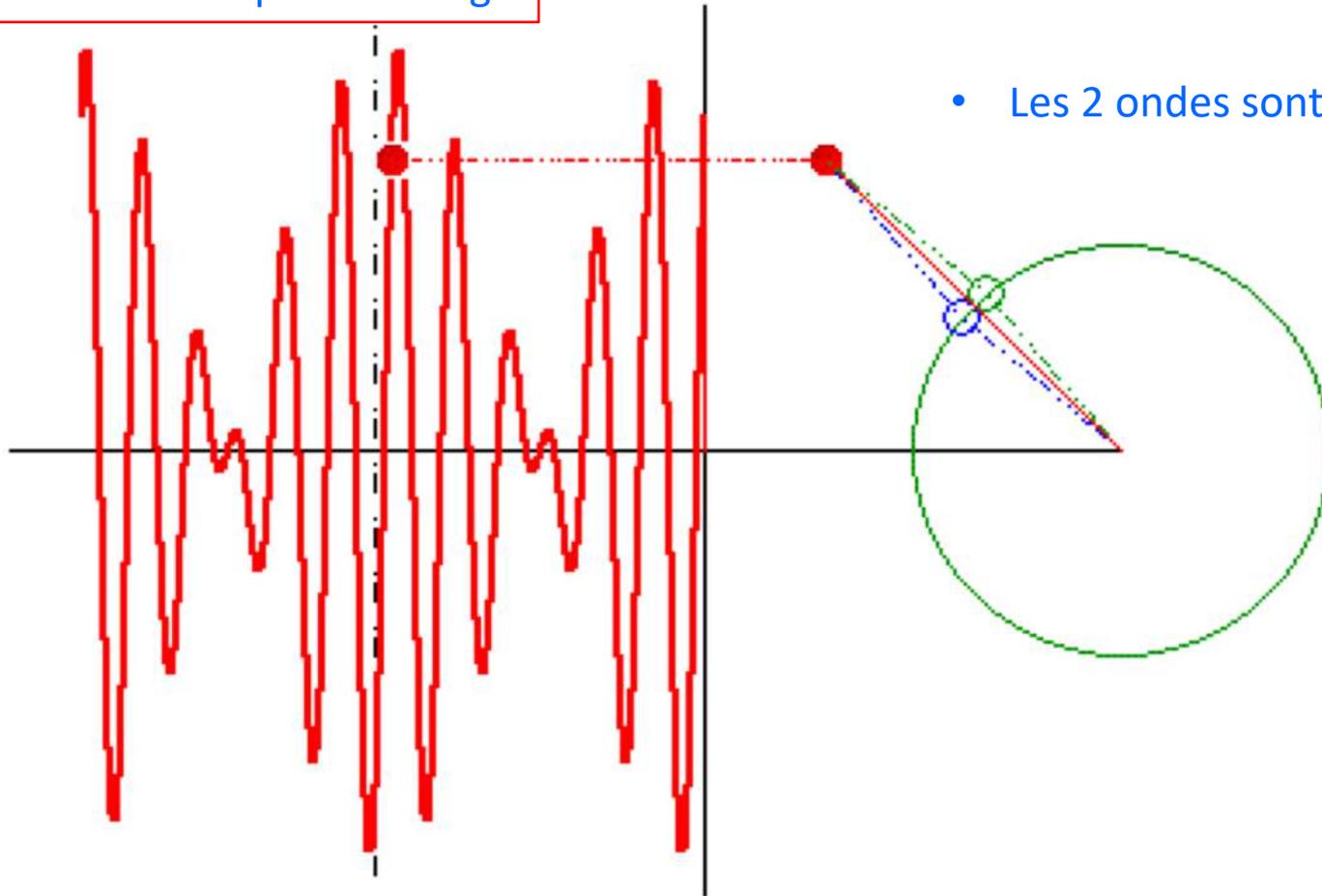
Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

Fréquences différentes
Différence de phase change



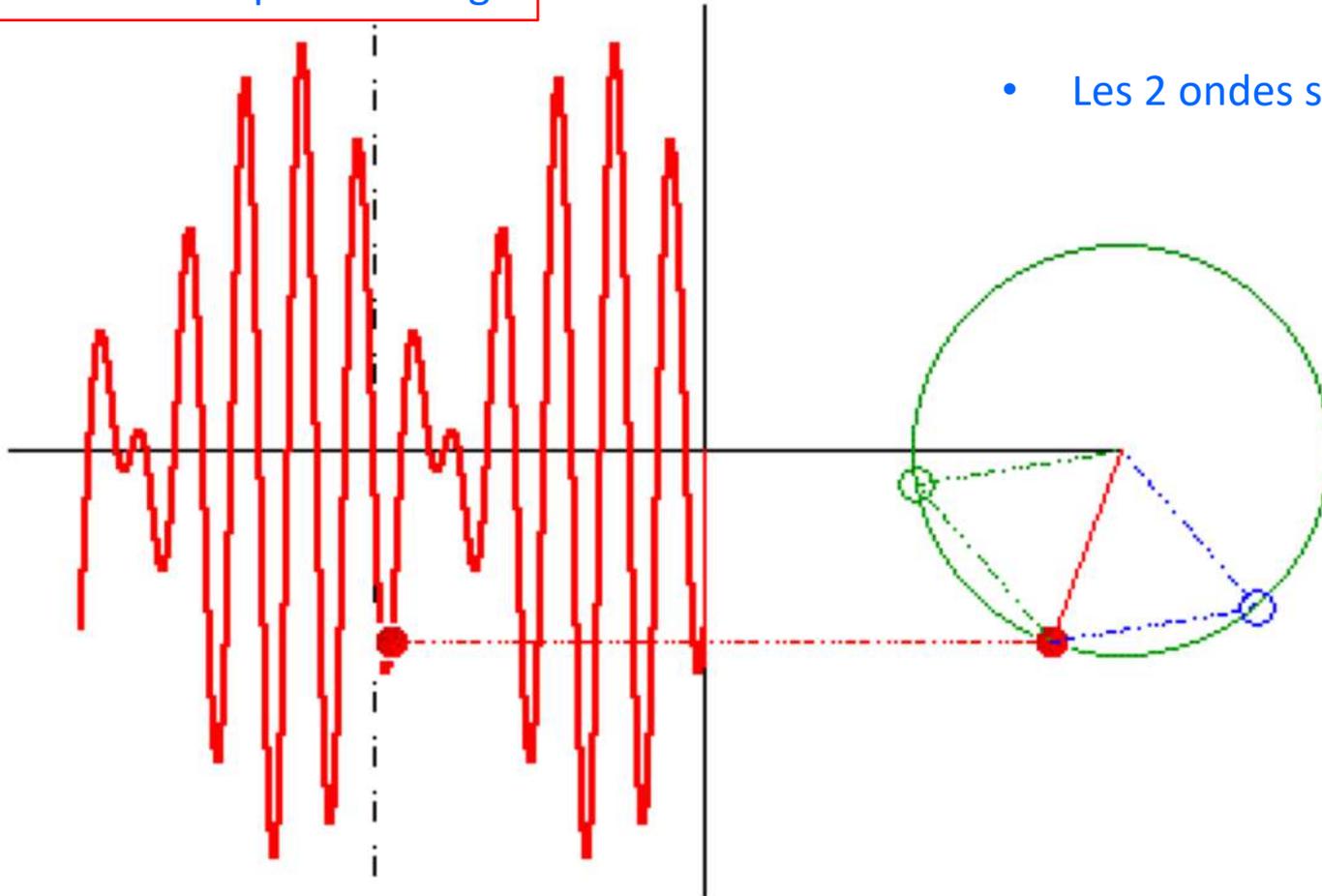
Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

Fréquences différentes
Différence de phase change



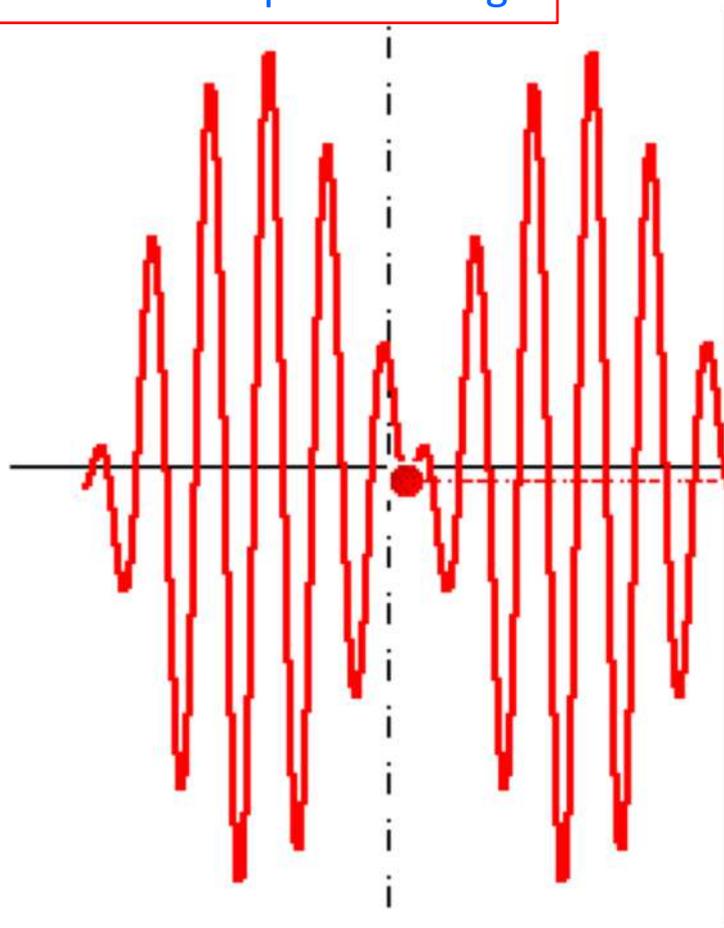
Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

Fréquences différentes
Différence de phase change

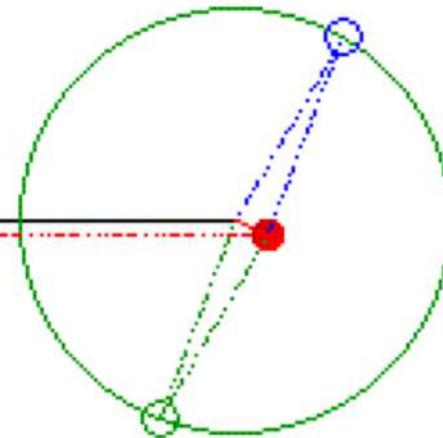


Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

Fréquences différentes
Différence de phase change



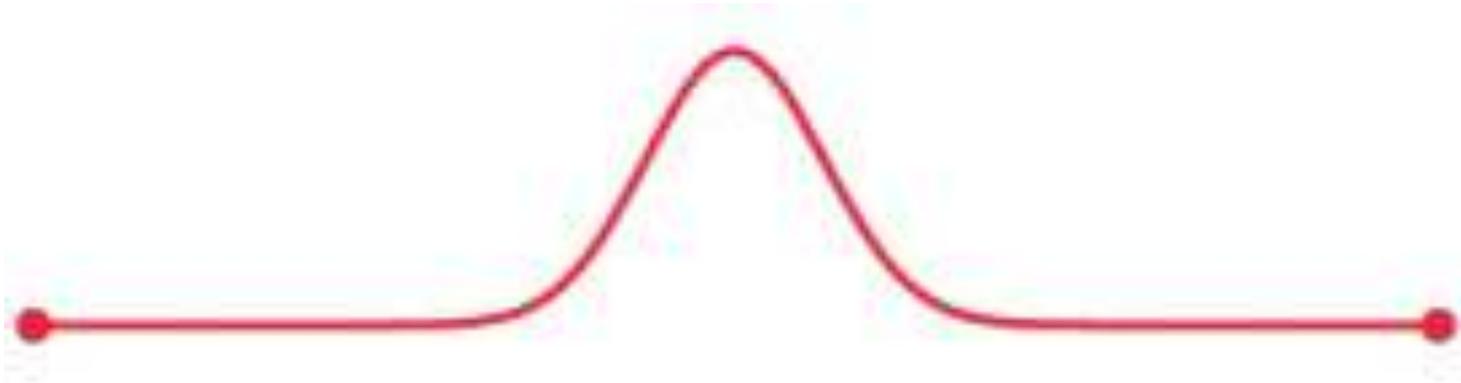
- Les 2 ondes sont en opposition de phase



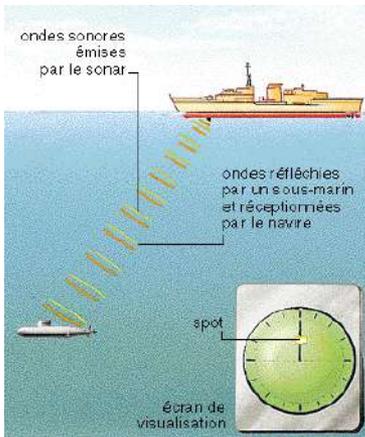
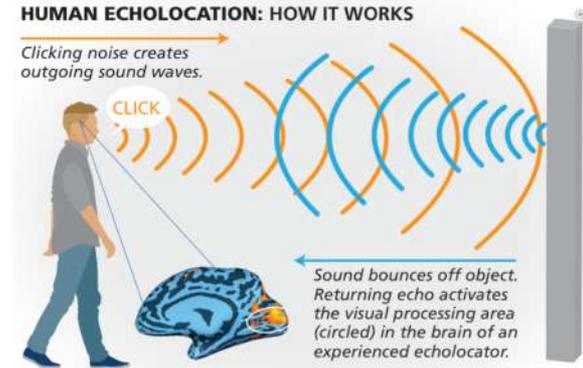
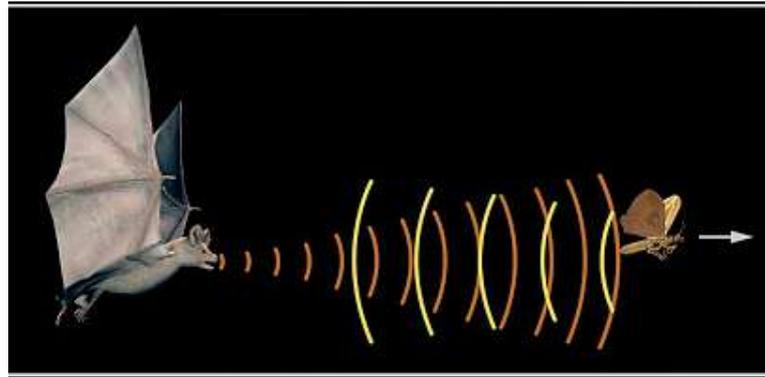
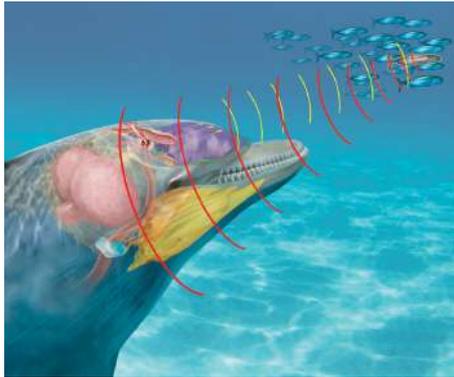
Réflexion



Réflexion



Echolocation



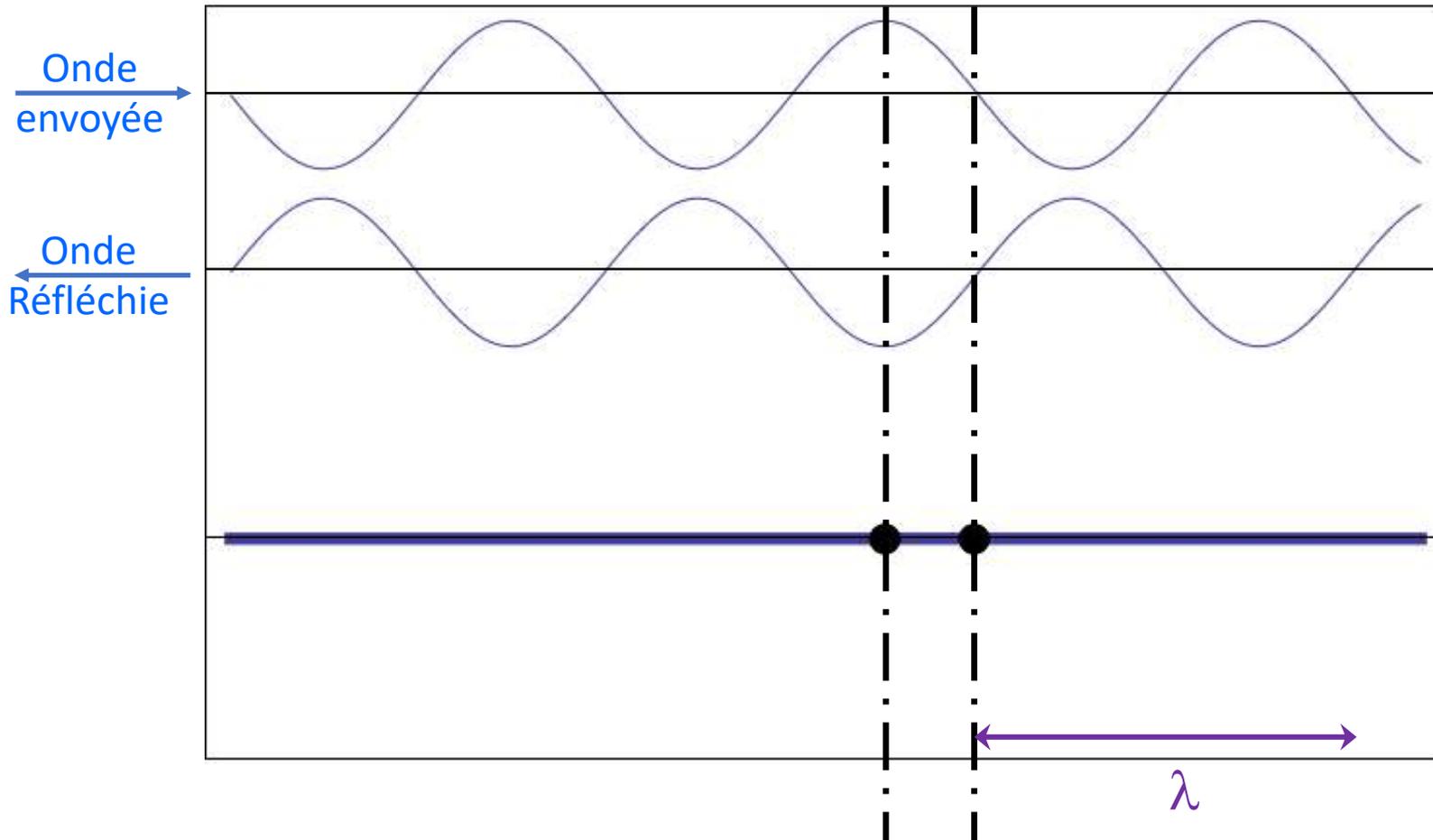
Le temps (t_{echo}) entre l'émission d'une onde et le retour de l'onde réfléchie donne la distance de l'objet.

$$\text{distance} = (t_{\text{echo}}/2) / v$$

Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

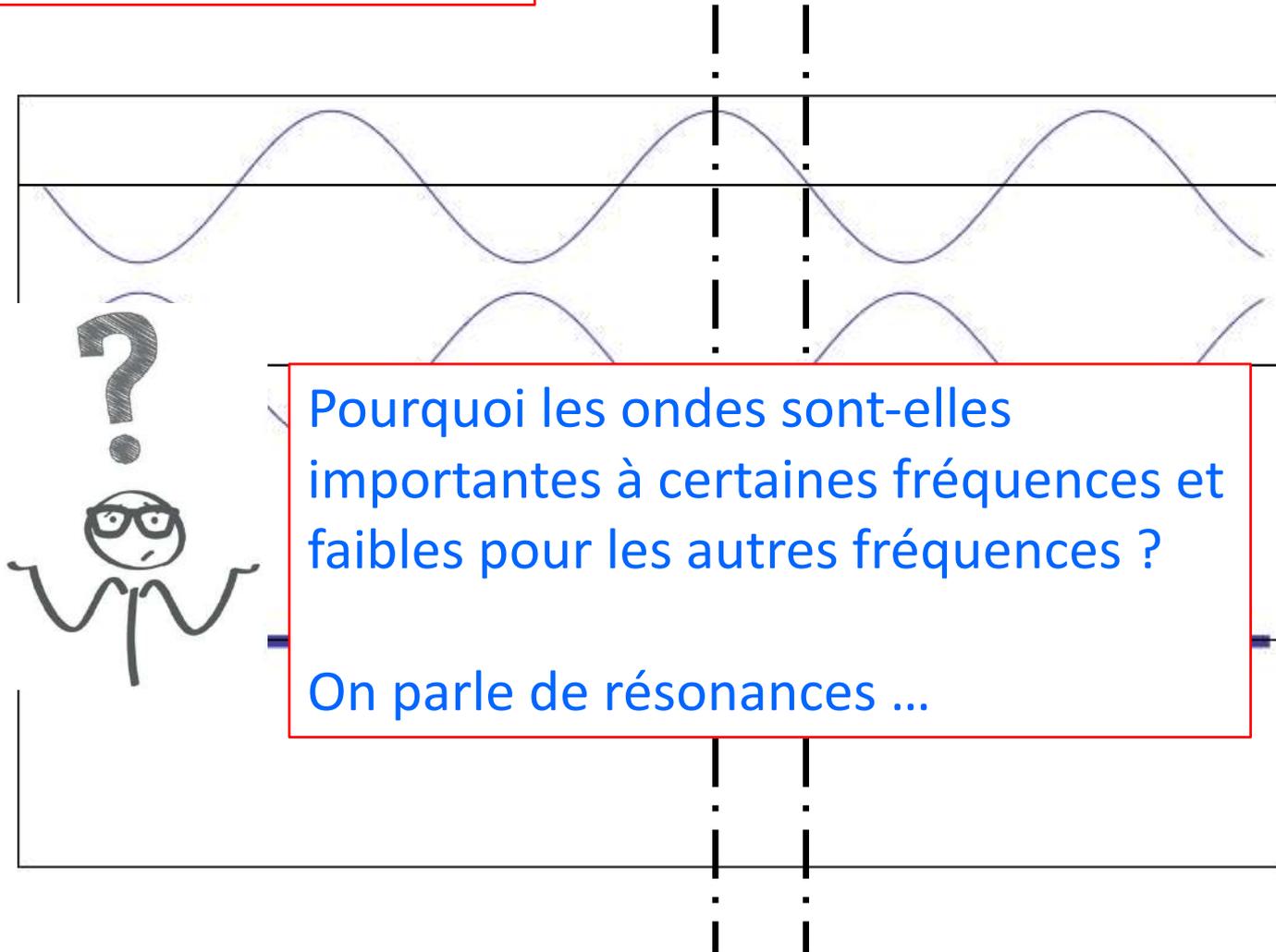


Mêmes fréquences, sens opposés



Addition : $A_1 + A_2 = A_{\text{tot}}$

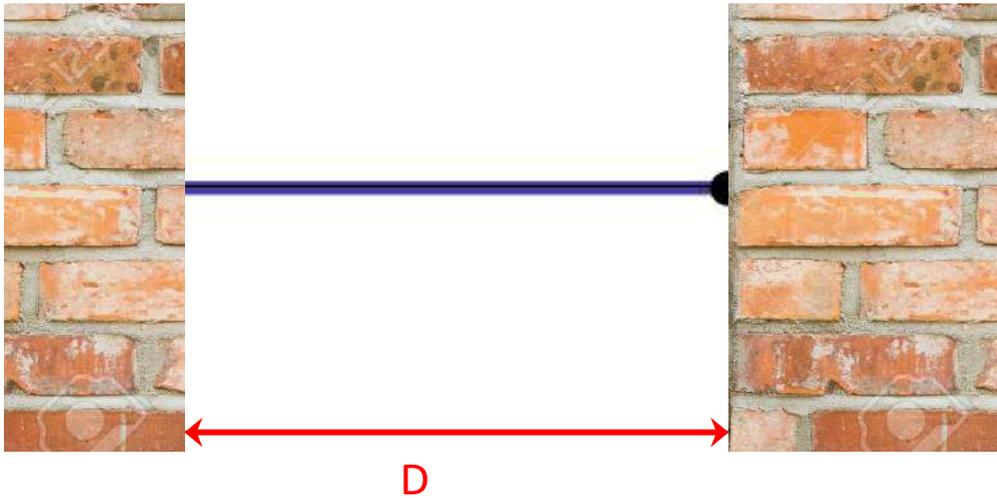
Mêmes fréquences, sens opposés



Pourquoi les ondes sont-elles importantes à certaines fréquences et faibles pour les autres fréquences ?

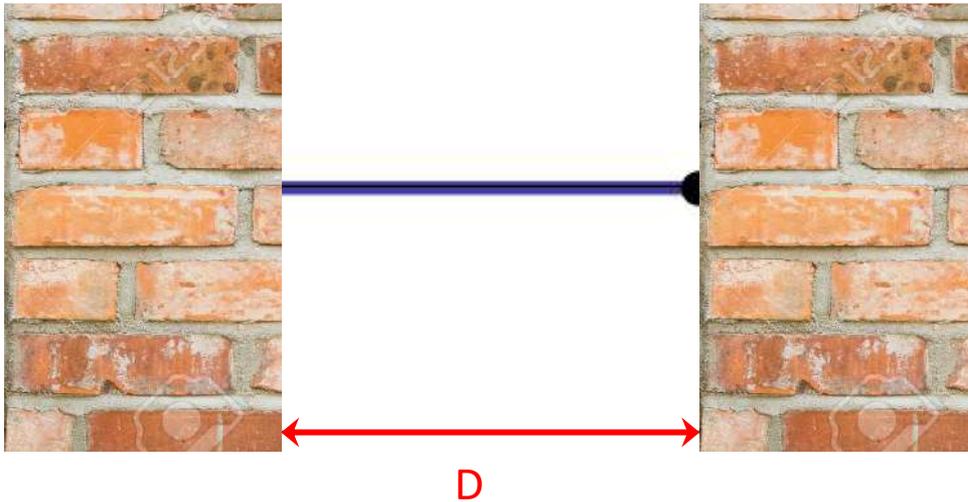
On parle de résonances ...

Résonances



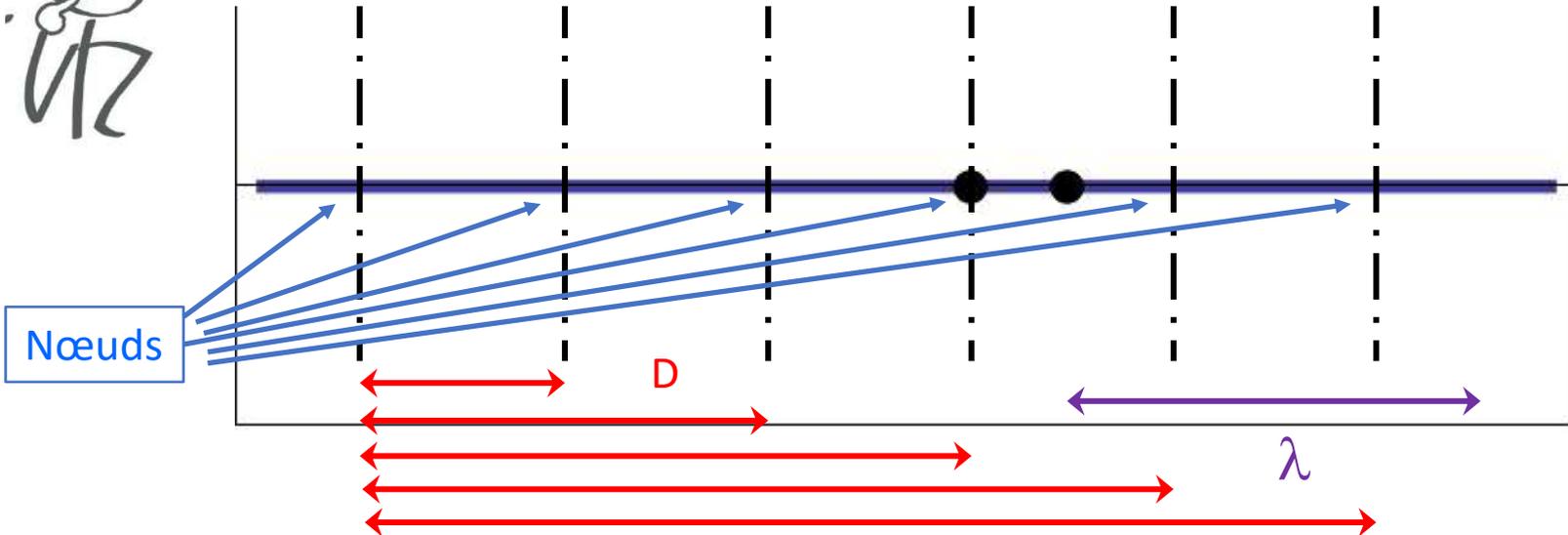
Résonances

$$D = \lambda$$



Résonances

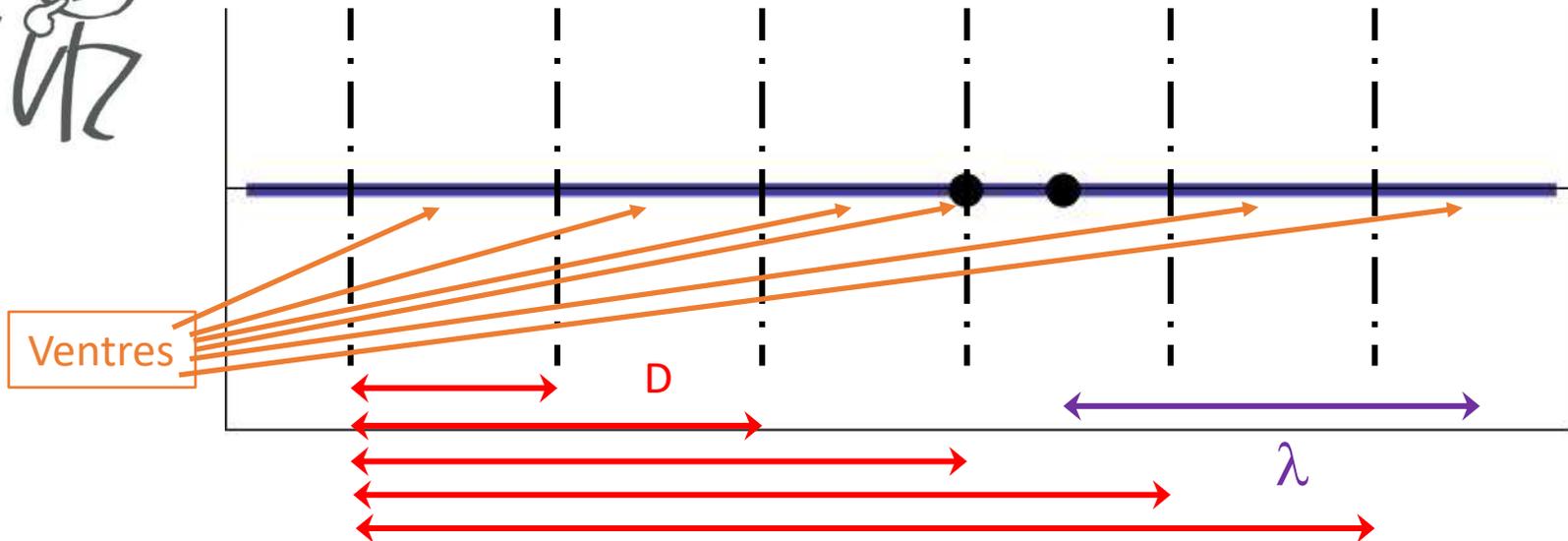
$$D = n\lambda/2$$



Résonances

$$D = n\lambda/2$$

n est le nombre de ventres

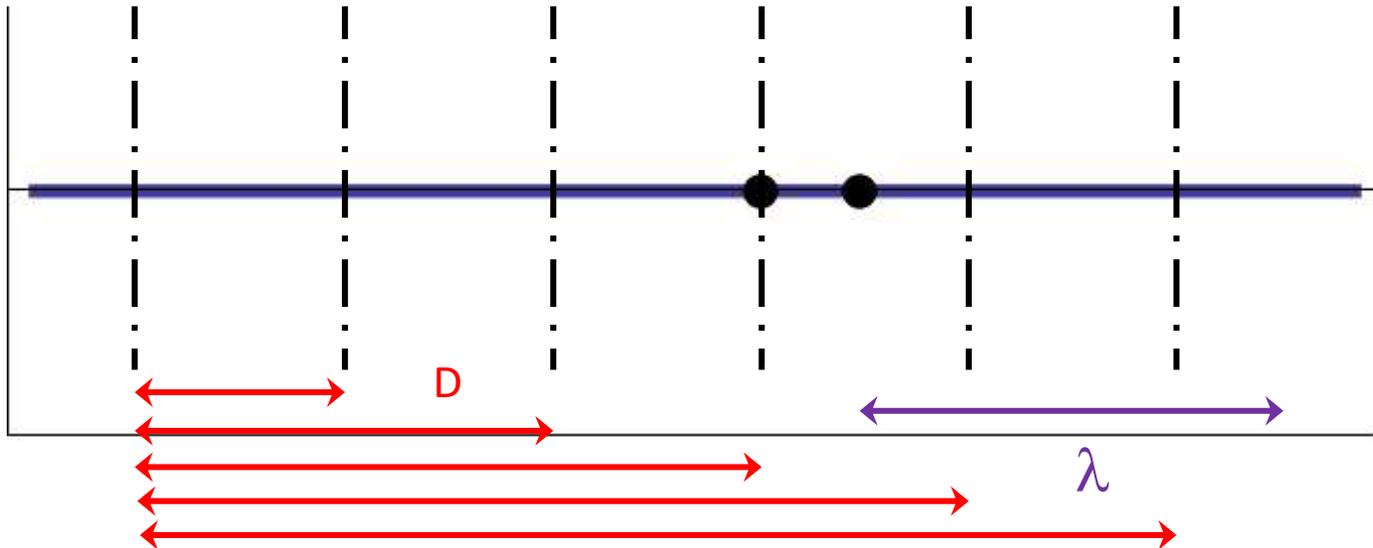


Résonances

$$D = n\lambda/2$$

Résonance si la fréquence est telle que

$$D = n\lambda/2 = n (\text{vitesse/fréquence}) / 2$$



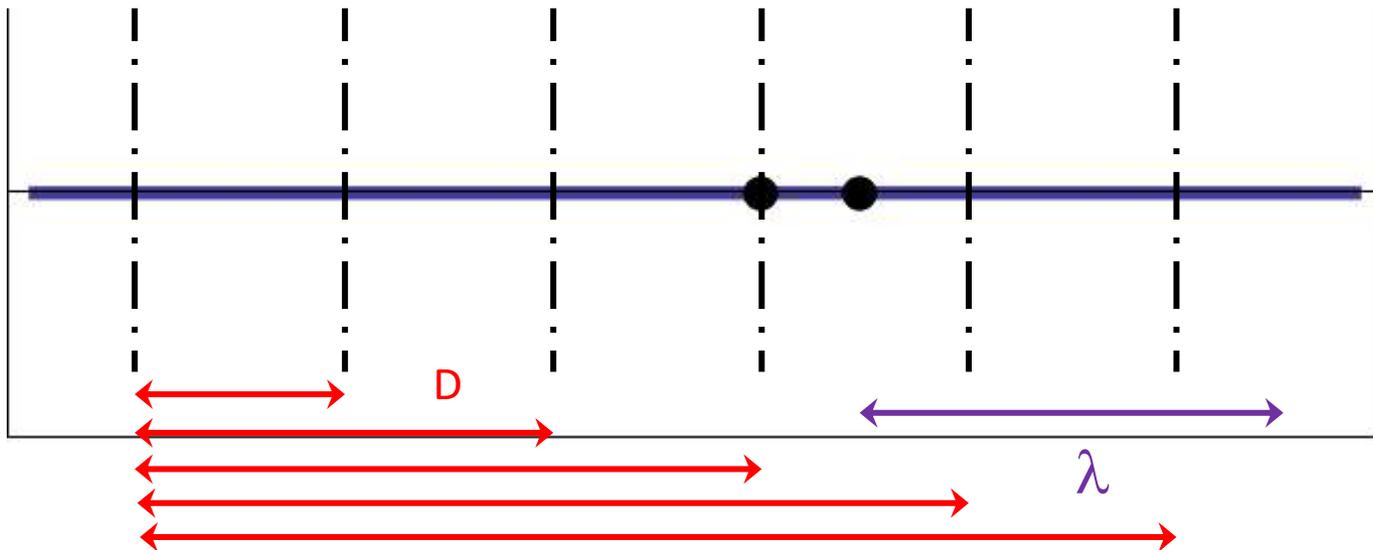
Résonances

$$D = n\lambda/2$$

Résonance si la fréquence est telle que

$$D = n\lambda/2 = n (\text{vitesse}/\text{fréquence}) / 2$$

En cas de résonance, on a donc : $\text{vitesse} = \text{fréquence} * 2D/n$



Résonances ... En 2 dimensions

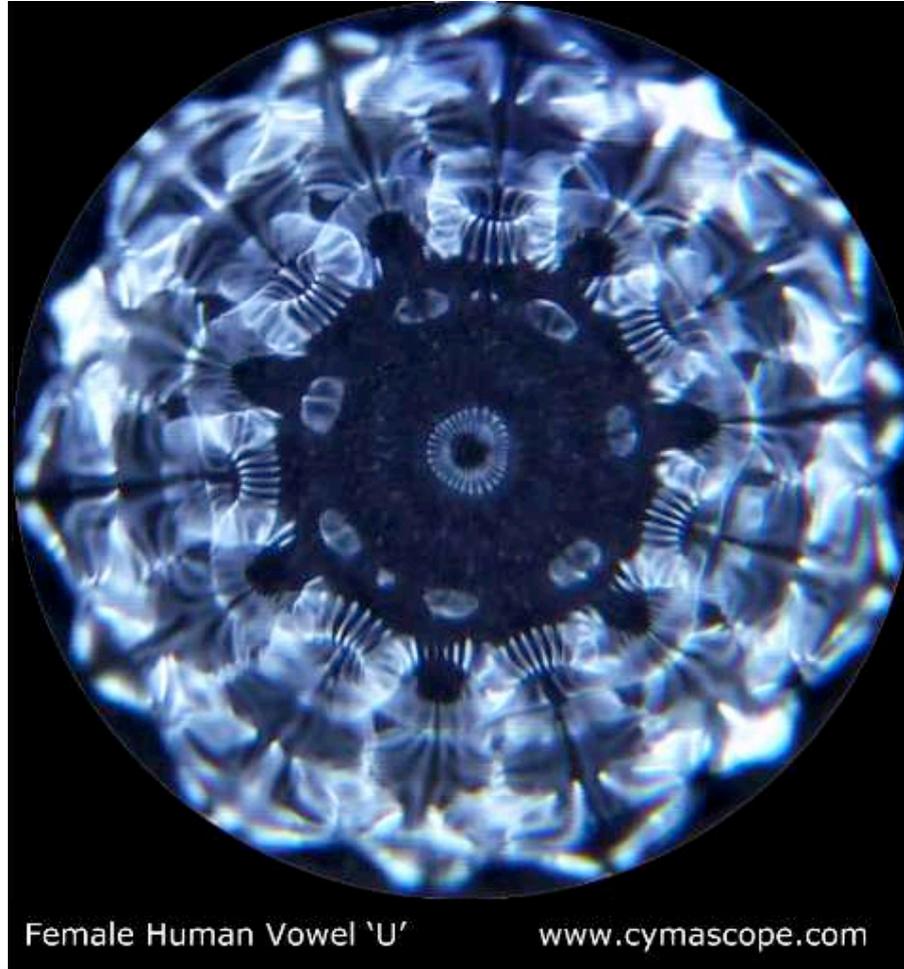
- **Figures de Chladni** (Ernst Chladni (1756-1827))

- expérience est réalisée en salle "Sons et vibrations" du Palais de la découverte
- <https://youtu.be/6kLmlbkWJZ8>



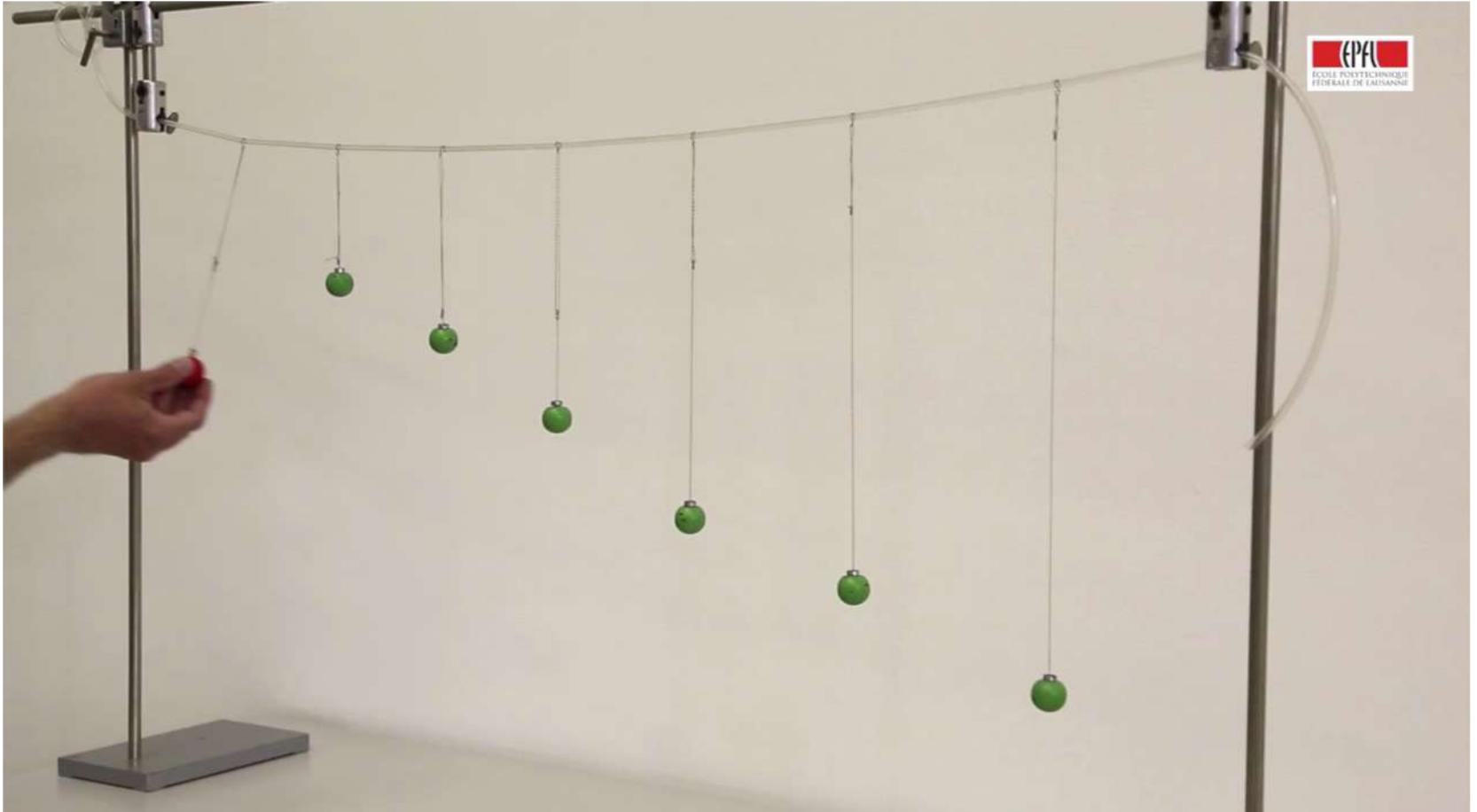
Résonances ... En 2 dimensions

- Vocalisation de la lettre U par une femme (en anglais)
 - <https://www.cymascope.com/>



Résonance

- On fait osciller la boule rouge. Que va-t-il se passer ?



Résonance

- Une référence de choix: le 1er cours de Thierry Pradier

(http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2019/01/upopphys_fiction_cours1-compressed.pdf)

III. Homogénéités et Analyse aux dimensions

Période d'oscillation du pendule de Tournesol

1- $T = f(\text{angle}, m, l, g)$

$$T = \text{Angle}^a M^b L^c (L \cdot T^{-2})^d = M^b L^{c+d} T^{-2d} = M^0 L^0 T^1$$

$$\rightarrow b = 0 !$$

$$\rightarrow -2d = 1 \rightarrow d = -1/2$$

$$\rightarrow c + d = c - 1/2 = 0 \rightarrow c = 1/2$$

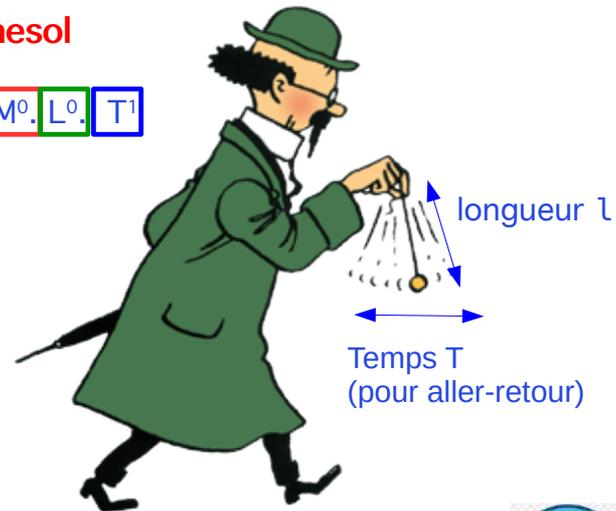
$$T \propto \sqrt{\frac{l}{g}} \text{ ou } T \sqrt{\frac{g}{l}} = \text{constante}$$

2- 5 paramètres, 3 dimensions (M, L, T)

→ 2 nombre sans dimensions : A + angle

→ A = f(angle)

$$T \sqrt{\frac{g}{l}} = f(\text{angle})$$



Vérifions expérimentalement ce résultat !

Résonance

- Une référence de choix: le 1er cours de Thierry Pradier

(http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2019/01/upopphys_fiction_cours1-compressed.pdf)

III. Homogénéités et Analyse aux dimensions

Période d'oscillation du pendule de Tournesol

1- $T = f(\text{angle}, m, l, g)$

$$T = \text{Angle}^a M^b L^c (L \cdot T^{-2})^d = M^b L^{c+d} T^{-2d} = M^0 L^0 T^1$$

$$\rightarrow b = 0 !$$

$$\rightarrow -2d = 1 \rightarrow d = -1/2$$

$$\rightarrow c + d = 0 \quad 1/2 = 0 \rightarrow c = 1/2$$

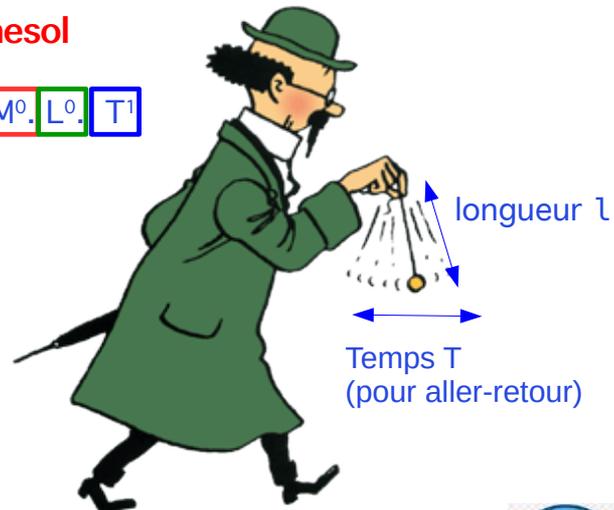
$$T \propto \sqrt{\frac{l}{g}} \text{ ou } T \sqrt{\frac{g}{l}} = \text{constante}$$

2- 5 paramètres, 3 dimensions (M, L, T)

→ 2 nombre sans dimensions : A + angle

→ A = f(angle)

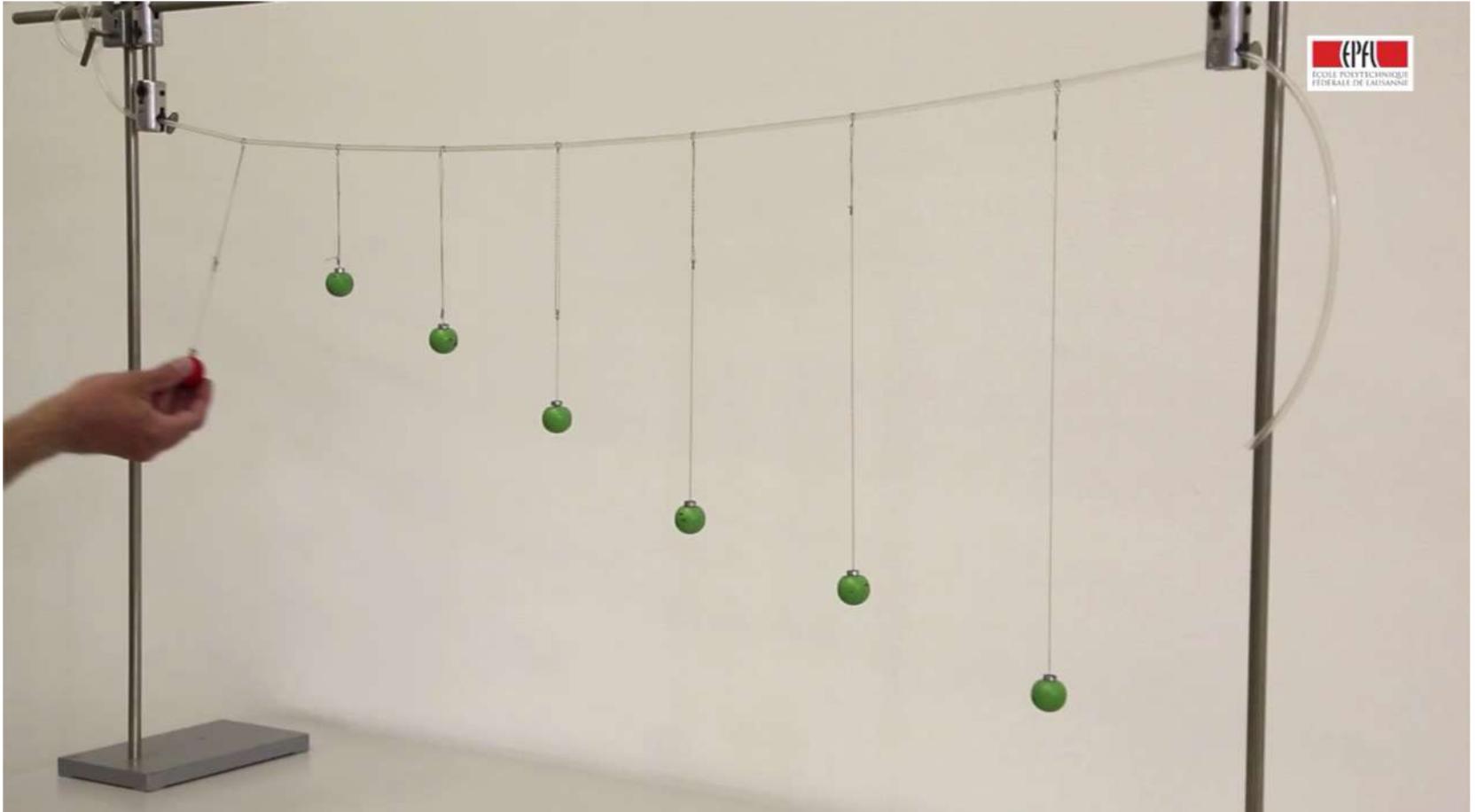
$$T \sqrt{\frac{g}{l}} = f(\text{angle})$$



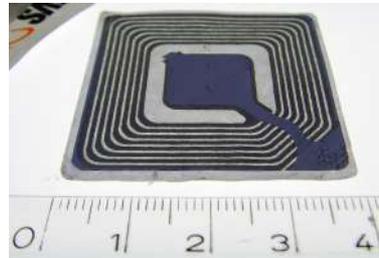
Vérifions expérimentalement ce résultat !

Résonance

- Le pendule qui oscille le plus est celui de même longueur que le rouge



Application du principe de résonance



- Quand la lumière se propage dans du verre, elle semble aller plus lentement:
 - $v(\text{lumière, verre}) = c/n$ où n = indice de réfraction
 - Pourquoi n dépend-il de la longueur d'onde ?
- L'explication qui suit est une version simplifiée de celle de Richard Feynmann présentée ici:

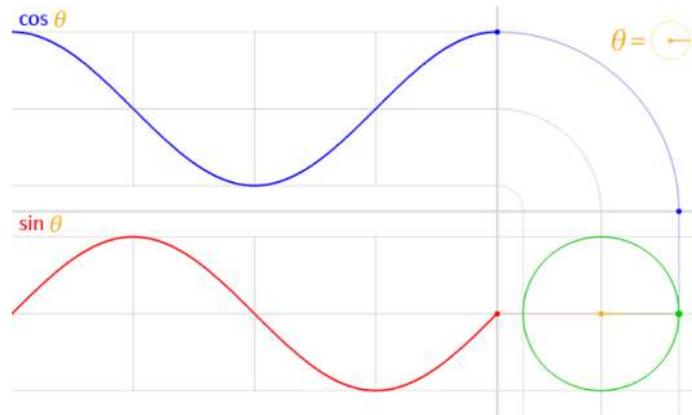
http://www.feynmanlectures.caltech.edu/l_31.html

- Soient:
 - « S » une source lumineuse
 - « R » l'endroit où on la reçoit
- Entre les deux, le vide... et l'onde qui oscille

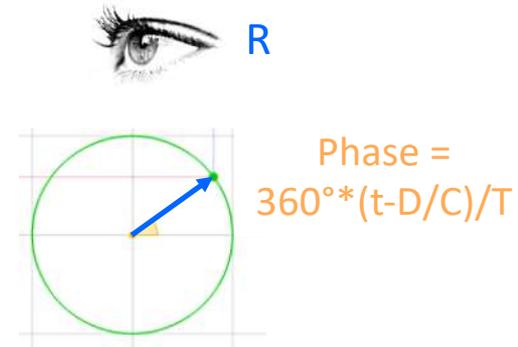
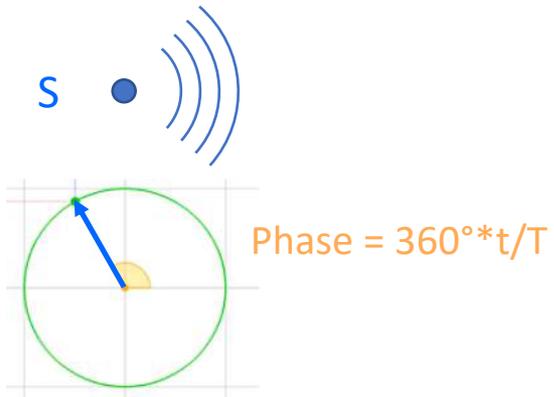


- Soient:

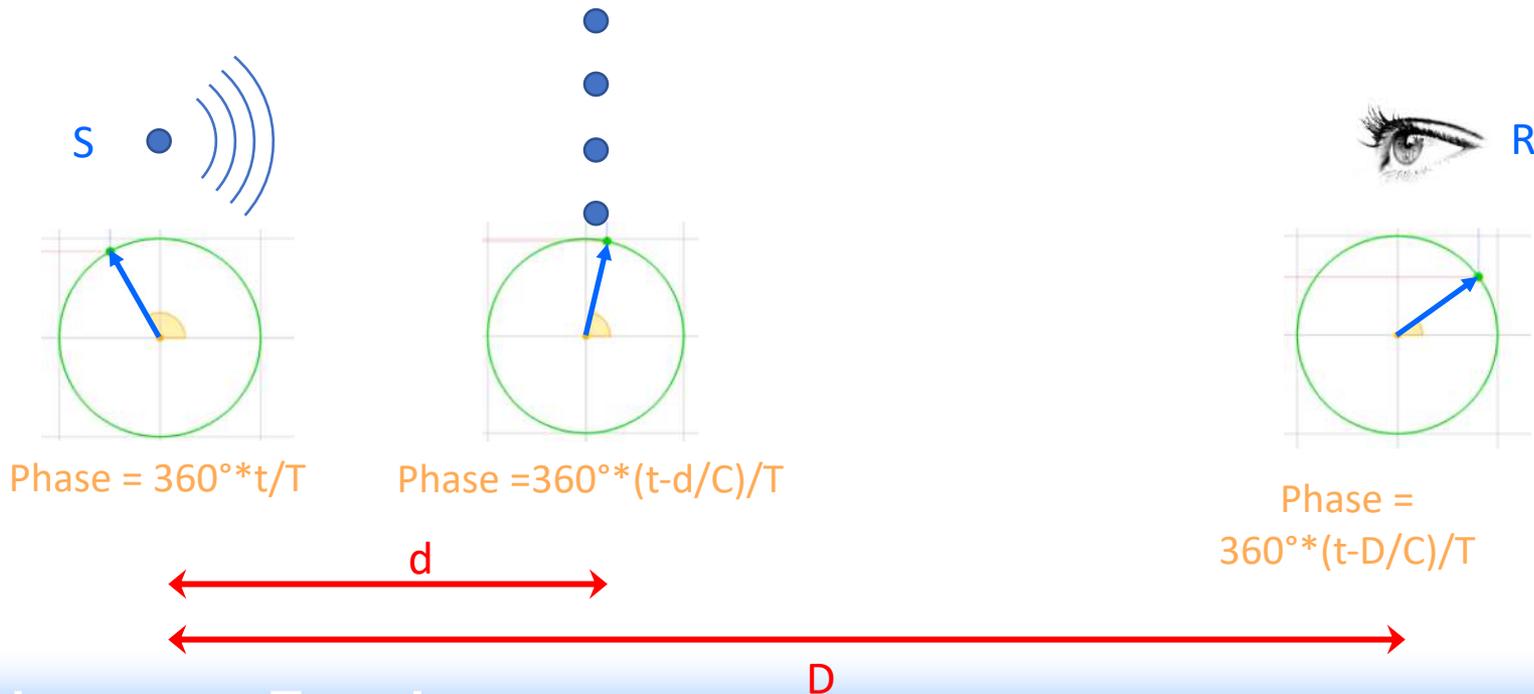
- « S » une source lumineuse
- « R » l'endroit où on la reçoit
- Entre les deux, le vide... et l'onde qui oscille



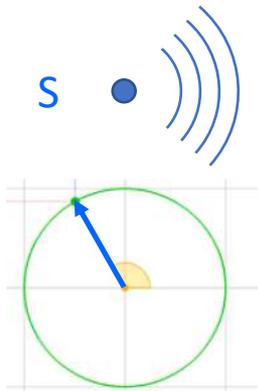
- Soient:
 - « S » une source lumineuse
 - « R » l'endroit où on la reçoit
- Entre les deux, le vide... et l'onde qui oscille



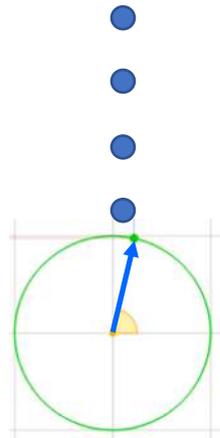
- Soient:
 - « S » une source lumineuse
 - « R » l'endroit où on la reçoit
- On introduit des atomes entre les deux



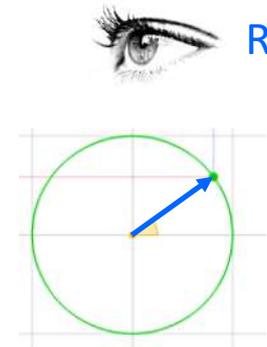
- Soient:
 - « S » une source lumineuse
 - « R » l'endroit où on la reçoit
- Les électrons des atomes vont osciller



$$\text{Phase} = 360^\circ \cdot t/T$$



$$\text{Phase} = 360^\circ \cdot (t-d/C)/T$$

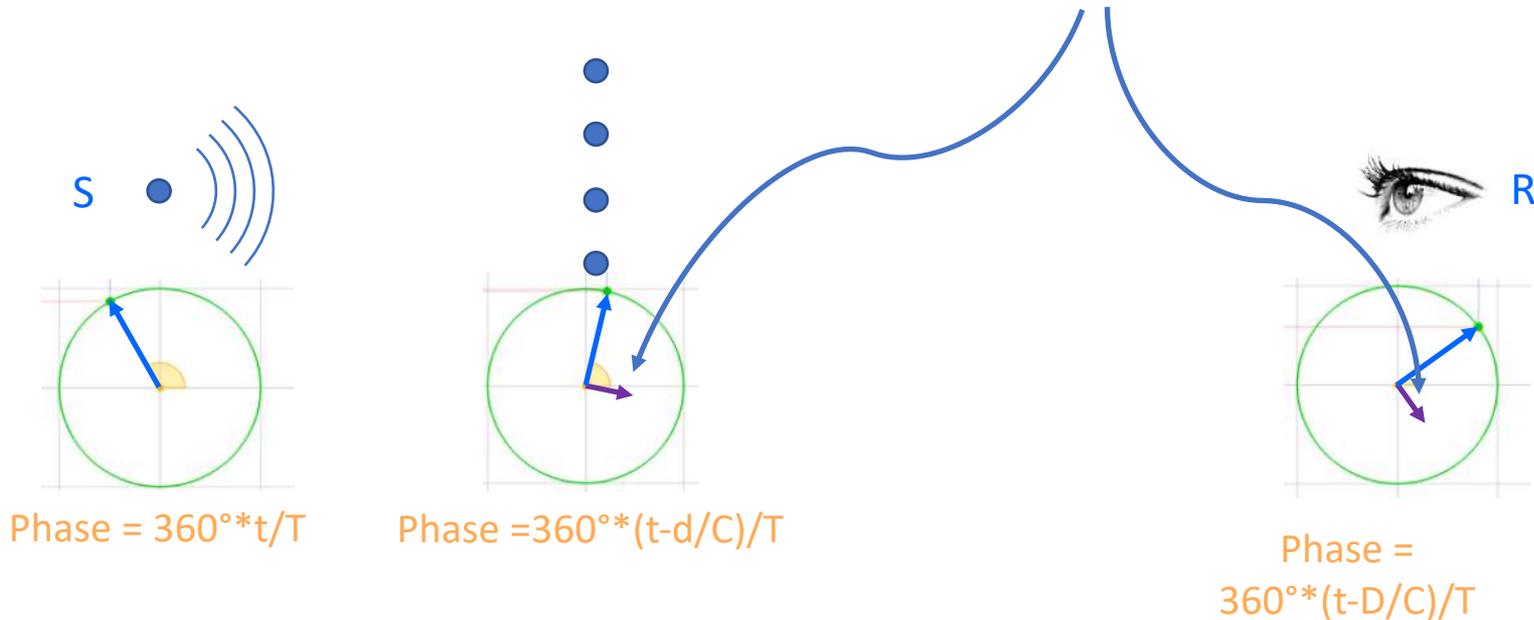


$$\text{Phase} = 360^\circ \cdot (t-D/C)/T$$

- Soient:

- « S » une source lumineuse
- « R » l'endroit où on la reçoit

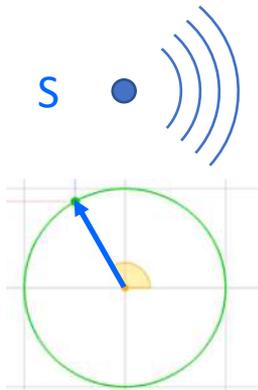
- Cette oscillation produit une nouvelle onde



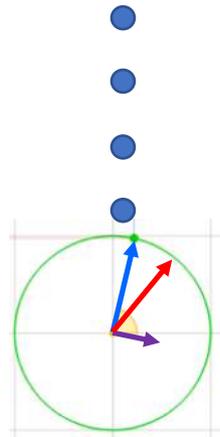
- Soient:

- « S » une source lumineuse
- « R » l'endroit où on la reçoit

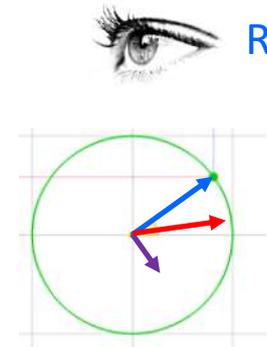
- L'onde transmise est la somme des deux ondes



Phase = $360^\circ * t/T$



Phase = $360^\circ * (t-d/C)/T$

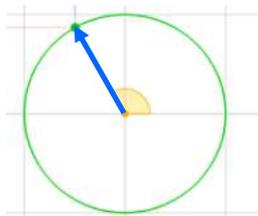


Phase = $360^\circ * (t-D/C)/T$

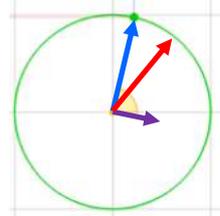
- Soient:

- « S » une source lumineuse
- « R » l'endroit où on la reçoit

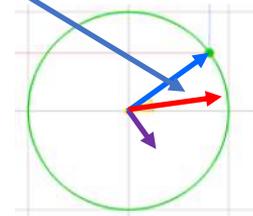
- L'onde transmise est la somme des deux ondes
Elle est « en retard »...



Phase = $360^\circ * t/T$



Phase = $360^\circ * (t-d/C)/T$



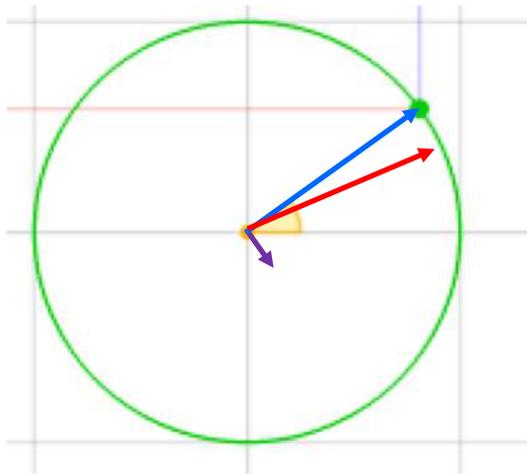
Phase = $360^\circ * (t-D/C)/T$

Vers l'indice de réfraction

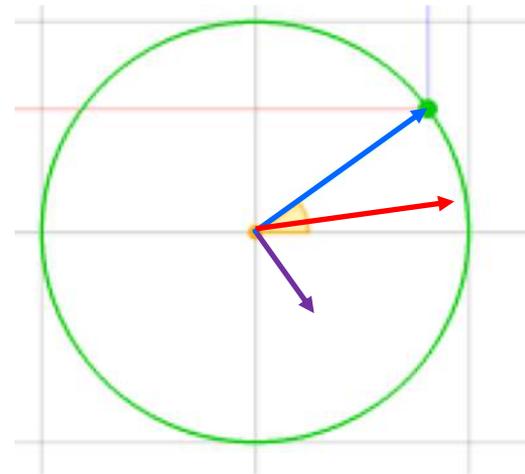
PISTE ROUGE

- Pourquoi le retard dépend-il de la longueur d'onde ?

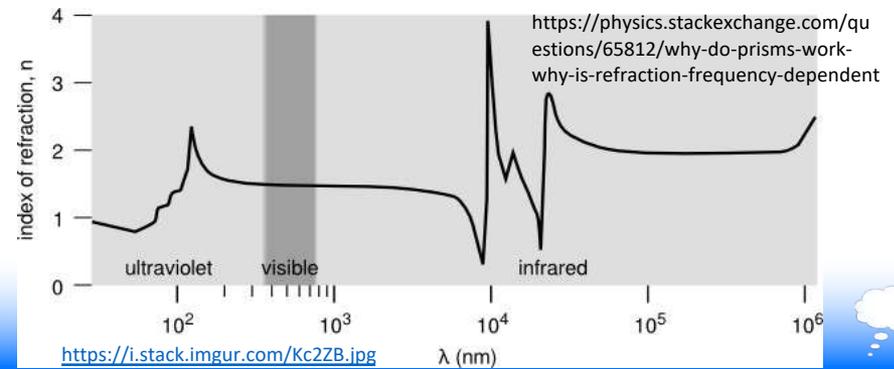
Si les électrons réagissent **peu**,
l'onde qu'ils produisent est **petite**...
Et le **retard est petit**



Si les électrons réagissent **fort**,
l'onde qu'ils produisent est **grande**...
Et le **retard est grand**

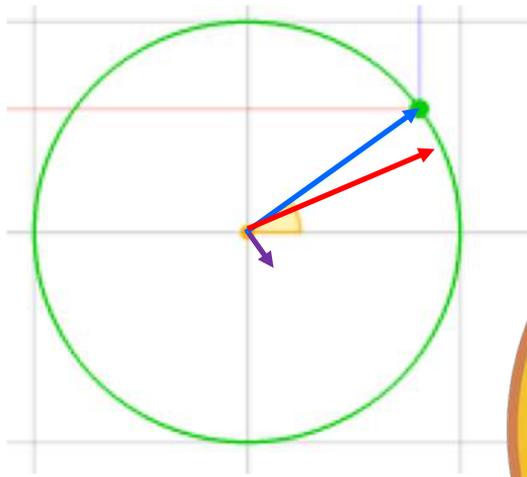


Les électrons réagissent fort si la fréquence de l'onde est proche de la fréquence de résonance du matériau.

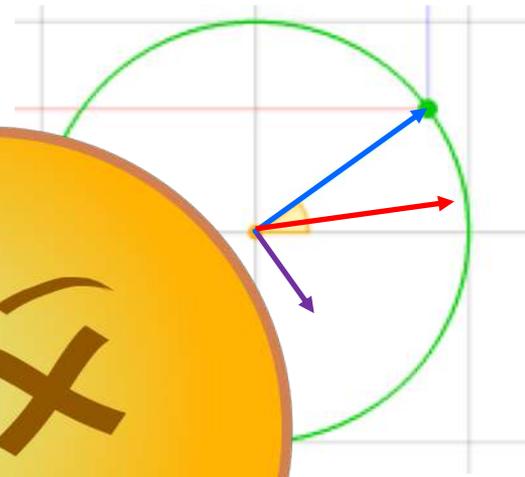


- Pourquoi le retard dépend-il de la longueur d'onde ?

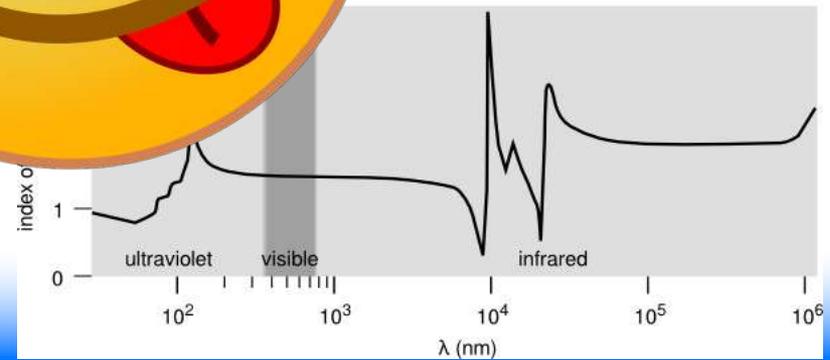
Si les électrons réagissent **peu**,
l'onde qu'ils produisent est **petite**...
Et le **retard est petit**



Si les électrons réagissent **fort**,
l'onde qu'ils produisent est **grande**...
Et le **retard est grand**



Les électrons réagissent fort si la fréquence de résonance des atomes est proche de



Un repos bien mérité

- Vers la polarisation



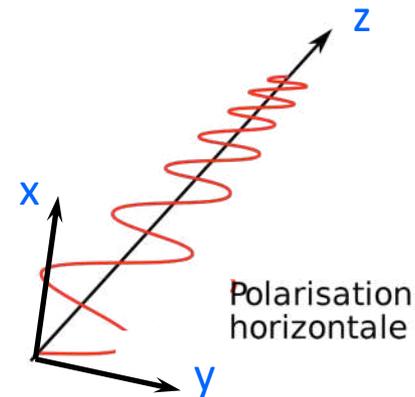
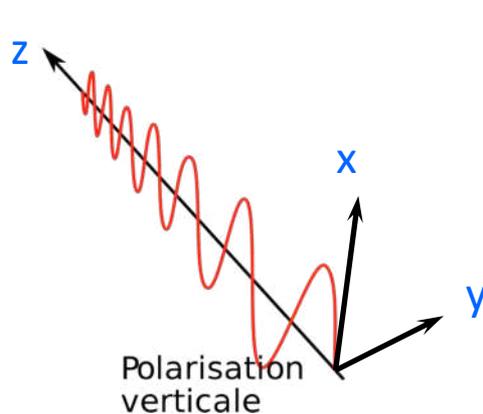
Verres solaires classiques



Verres solaires polarisés

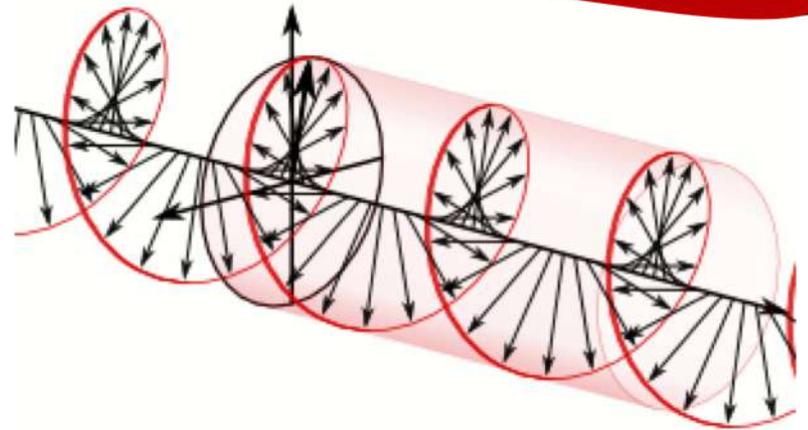
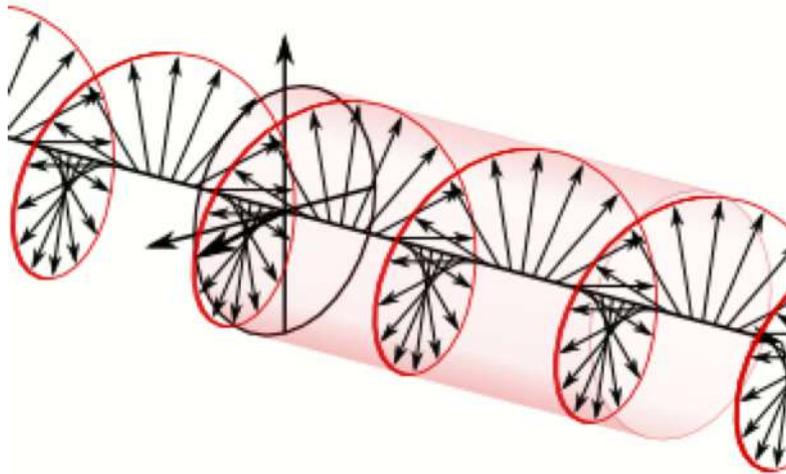
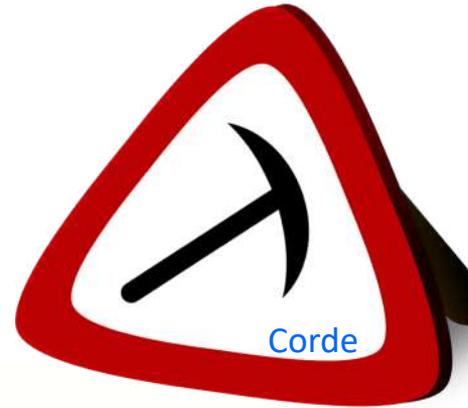
La lumière polarisée

- La lumière peut être polarisée de différentes façons
 - Polarisation linéaire perpendiculaire à la propagation
 - $E_x = \cos[2\pi/\lambda*(ct - z) + \text{phase}]$, $E_y = 0$
ou
 - $E_x = 0$, $E_y = \cos[2\pi/\lambda*(ct - z) + \text{phase}]$



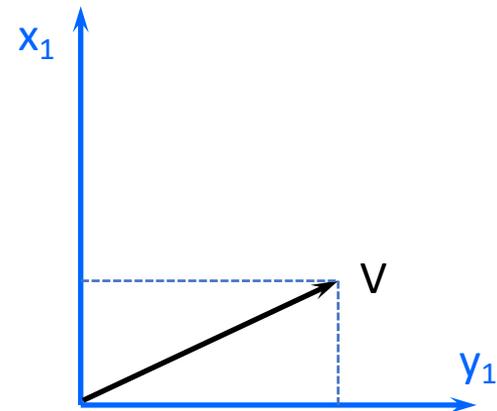
La lumière polarisée

- La lumière peut être polarisée de différentes façons
 - Polarisation circulaire horaire ou anti-horaire
 - $E_x = \cos[2\pi/\lambda*(ct - z)]$, $E_y = \sin[2\pi/\lambda*(ct - z)]$
ou
 - $E_x = \sin[2\pi/\lambda*(ct - z)]$, $E_y = \cos[2\pi/\lambda*(ct - z)]$



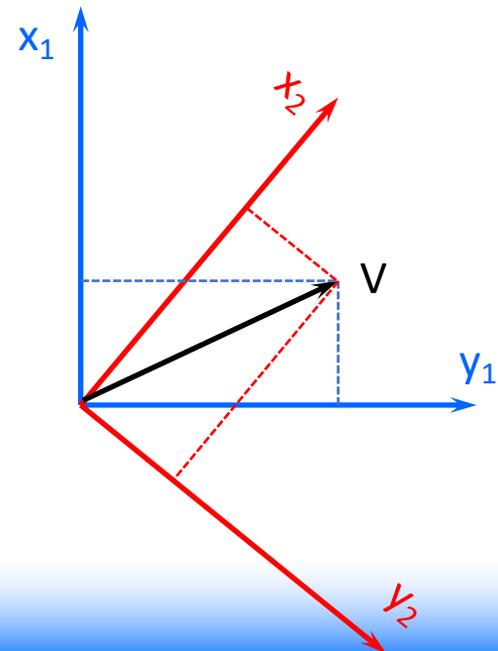
La lumière polarisée

- On peut décrire une lumière polarisée circulairement comme la somme de deux lumières polarisées linéairement... Et inversement. On parle de changement de base.
- **Analogie**: dans le plan de cet écran, je peux décrire V en donnant ses coordonnées
 - dans le repère x_1, y_1



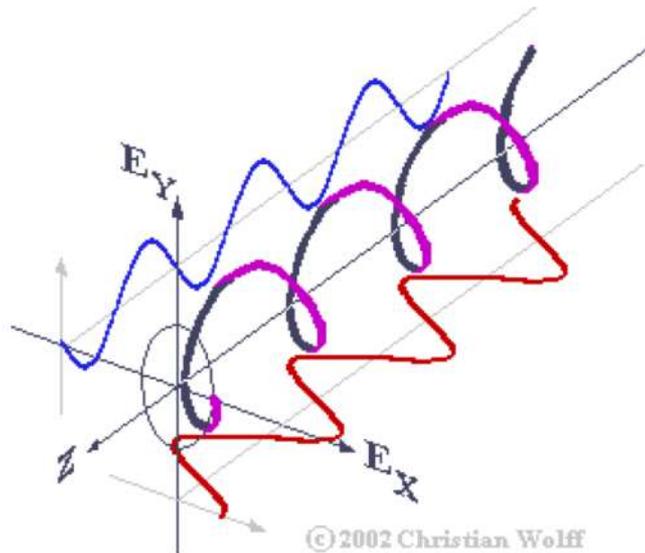
La lumière polarisée

- On peut décrire une lumière polarisée circulairement comme la somme de deux lumières polarisées linéairement... Et inversement. On parle de changement de base.
- **Analogie:** dans le plan de cet écran, je peux décrire V en donnant ses coordonnées
 - dans le repère x_1, y_1
 - ou
 - dans le repère x_2, y_2



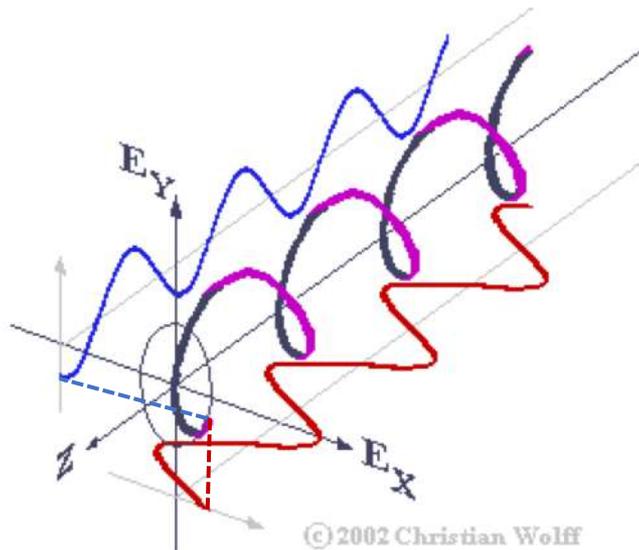
La lumière polarisée

- On peut décrire une lumière polarisée circulairement comme la somme de deux lumières polarisées linéairement... Et inversement. On parle de changement de base.



La lumière polarisée

- On peut décrire une lumière polarisée circulairement comme la somme de deux lumières polarisées linéairement... Et inversement. On parle de changement de base.

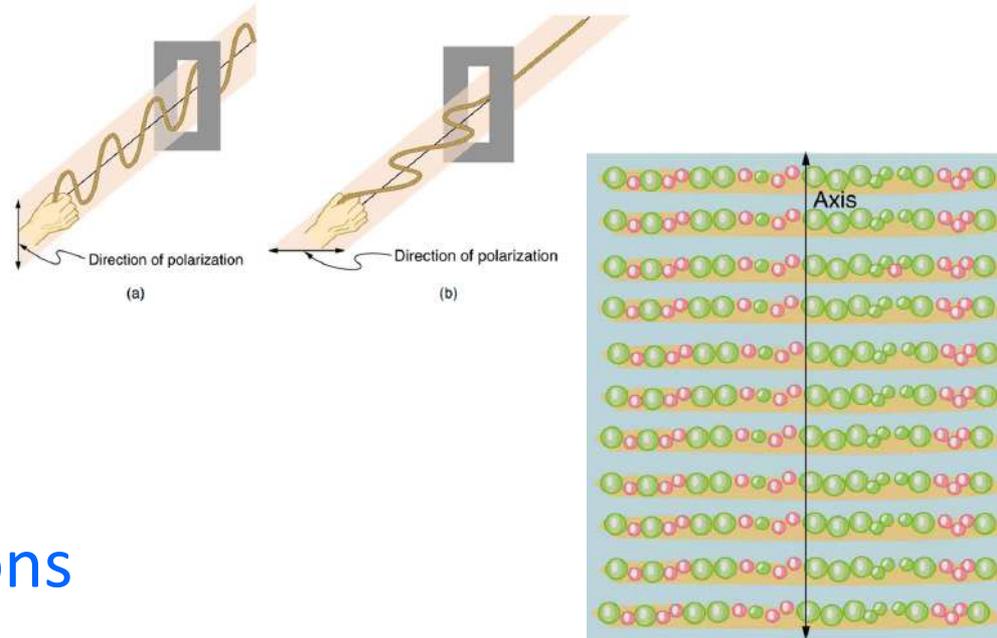


La lumière

- En général, la lumière n'est pas polarisée. Elle est composée d'une multitude de polarisations différentes.
- On peut la polariser avec des verres spéciaux
 - Les lunettes de soleil polarisent la lumière verticalement si elles sont bien conçues...
 - Il existe des matériaux qui polarisent circulairement.

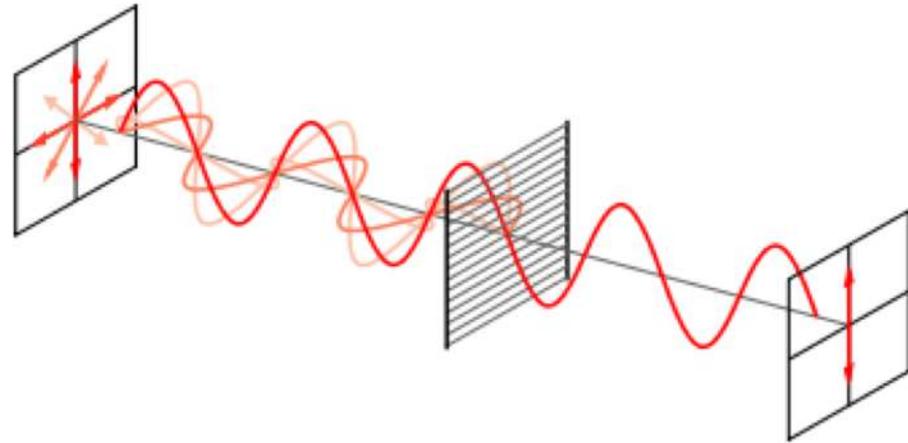
Expériences avec la polarisation

- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- Epaisseurs et tensions
- Ecran
- Lumière rasante



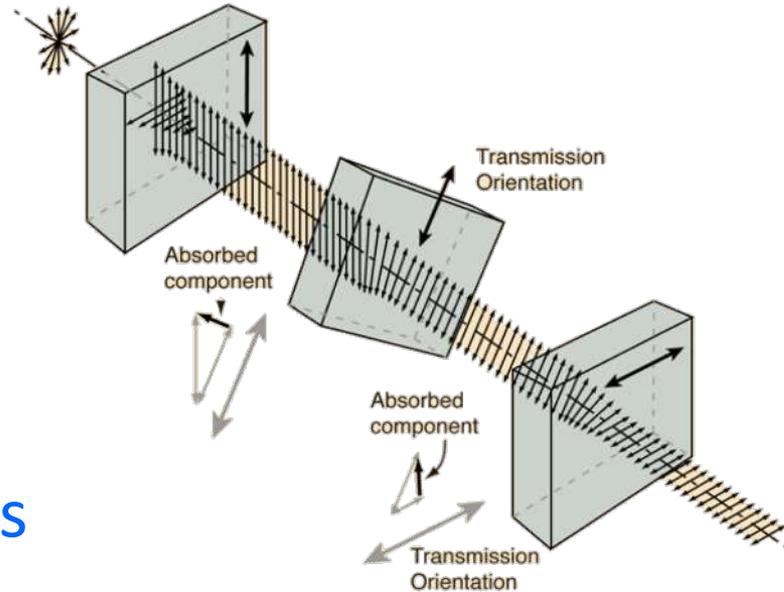
Expériences avec la polarisation

- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- Epaisseurs et tensions
- Ecran
- Lumière rasante



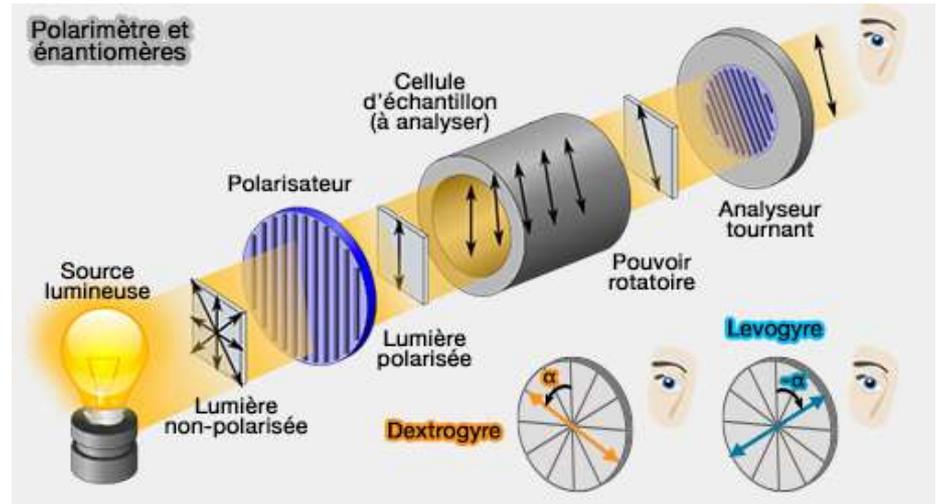
Expériences avec la polarisation

- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- Epaisseurs et tensions
- Ecran
- Lumière rasante



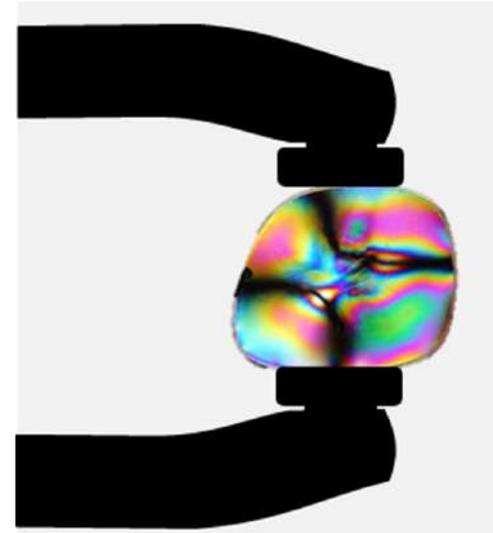
Expériences avec la polarisation

- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- Epaisseurs et tensions
- Ecran
- Lumière rasante



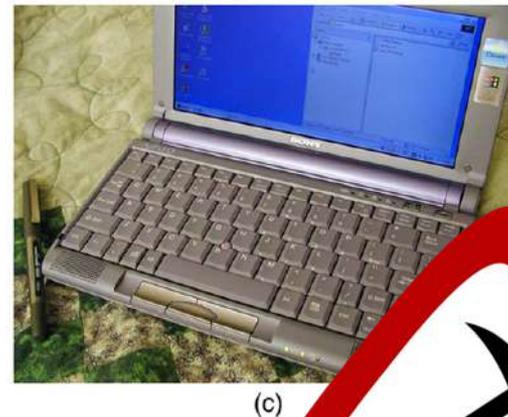
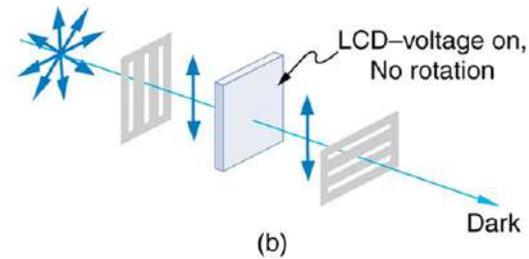
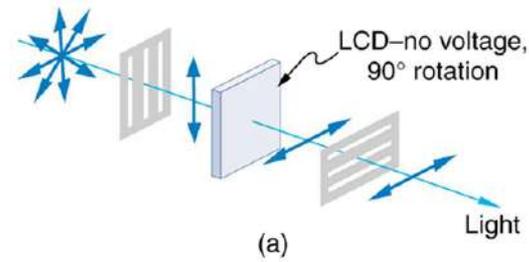
Expériences avec la polarisation

- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- **Epaisseurs et tensions**
- Ecran
- Lumière rasante



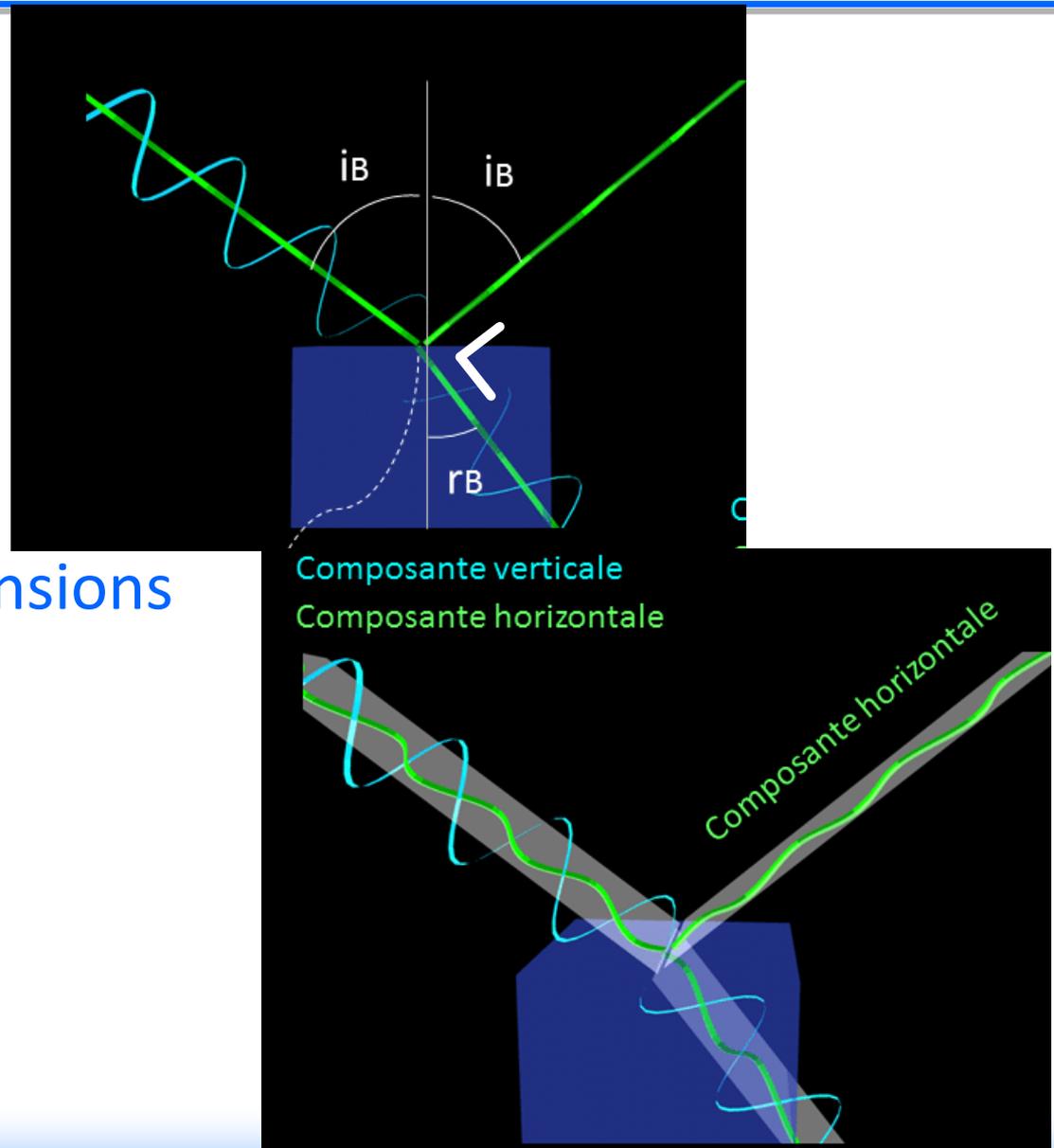
Expériences avec la polarisation

- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- Epaisseurs et tensions
- **Ecran**
- Lumière rasante

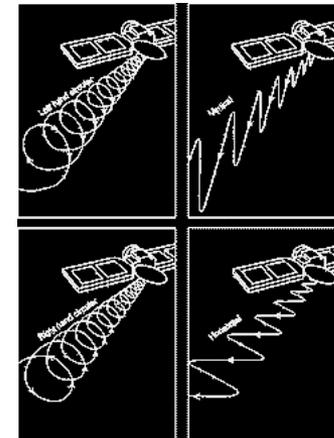
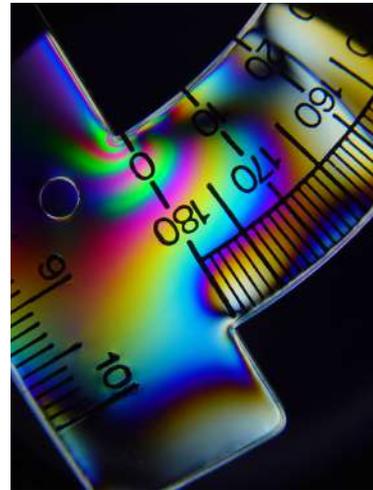
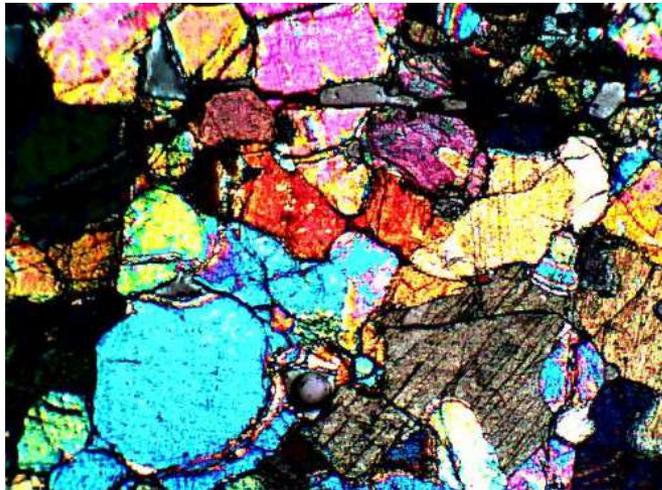
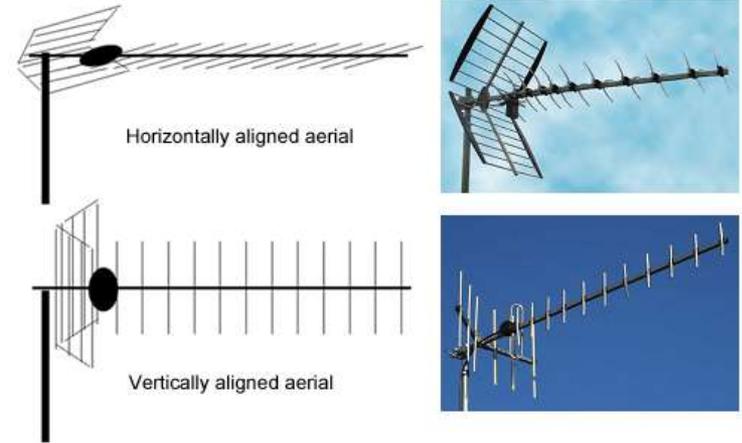


Expériences avec la polarisation

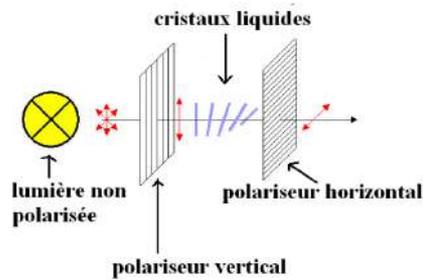
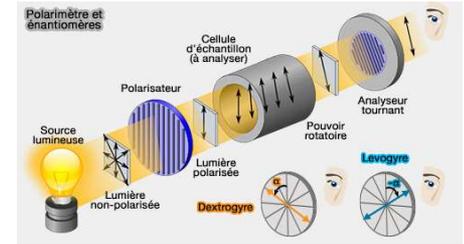
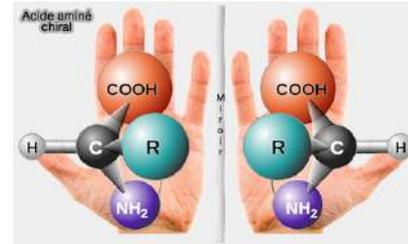
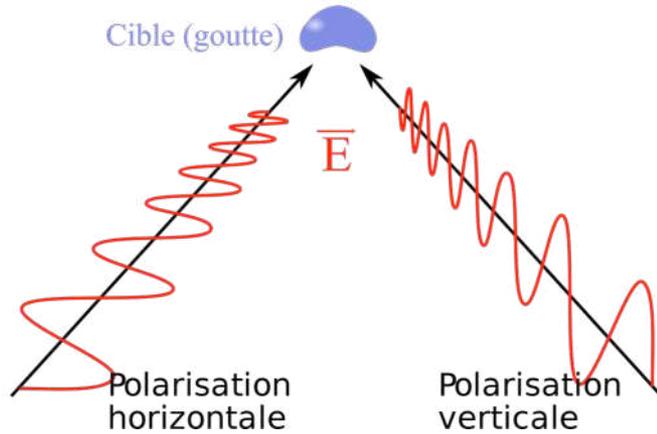
- La disparition
- Renaissance
- L'effet du sucre
- Epaisseurs et tensions
- Ecran
- Lumière rasante



Quelques utilisations de la polarisation

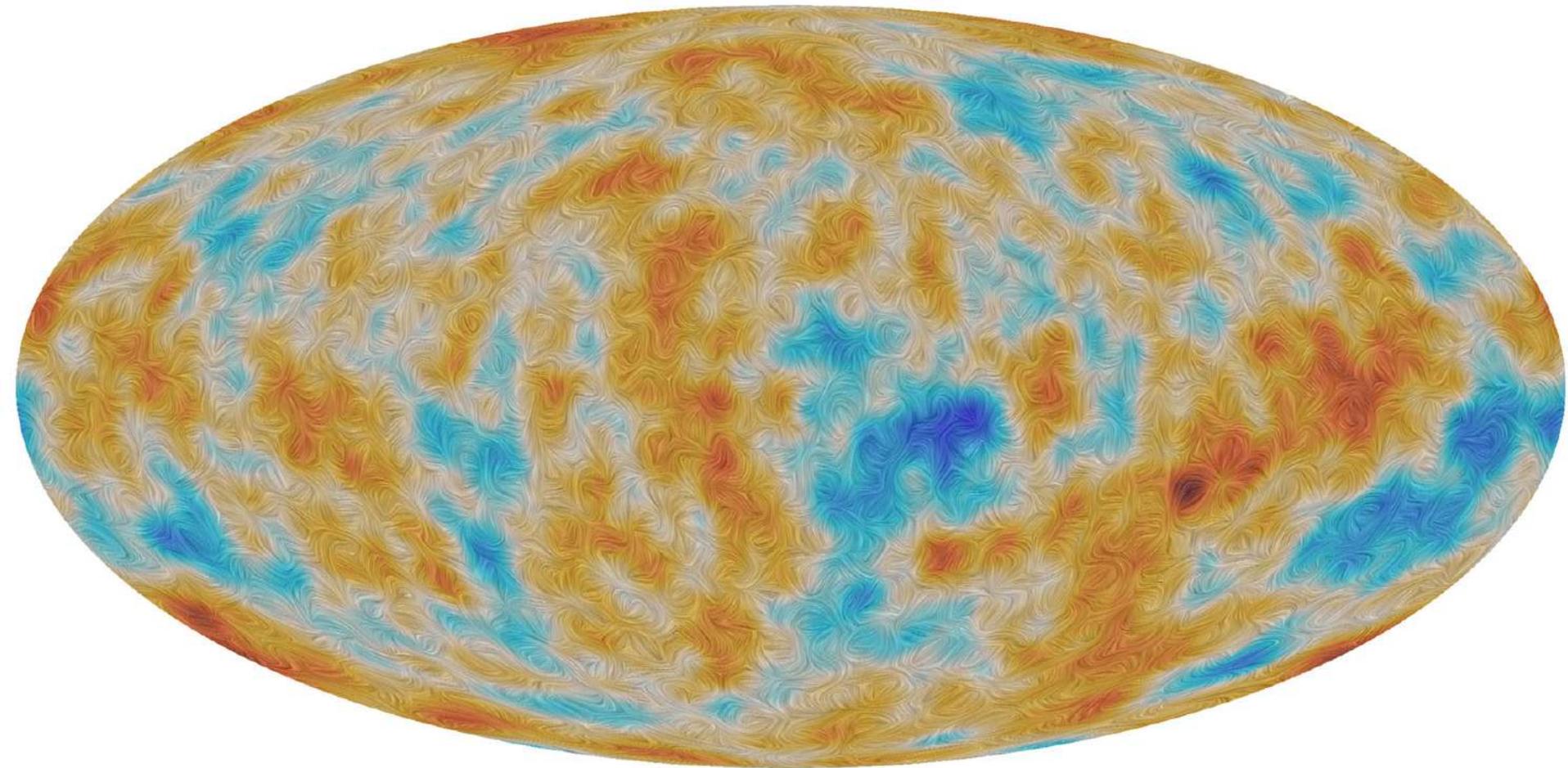


Quelques utilisations de la polarisation



Quelques utilisations de la polarisation

- Polarisation du fond diffus cosmologique



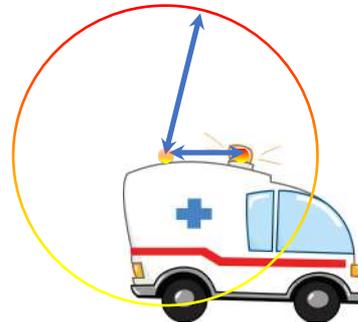
Effet Doppler

- Quand on croise une ambulance, on entend une sirène aigue à son approche et grave lorsqu'elle s'éloigne
- On va représenter les ondes de pression maximale.
 - L'onde se propage à la vitesse du son V_s ,
 - l'ambulance avance à $V_a (< V_s)$.



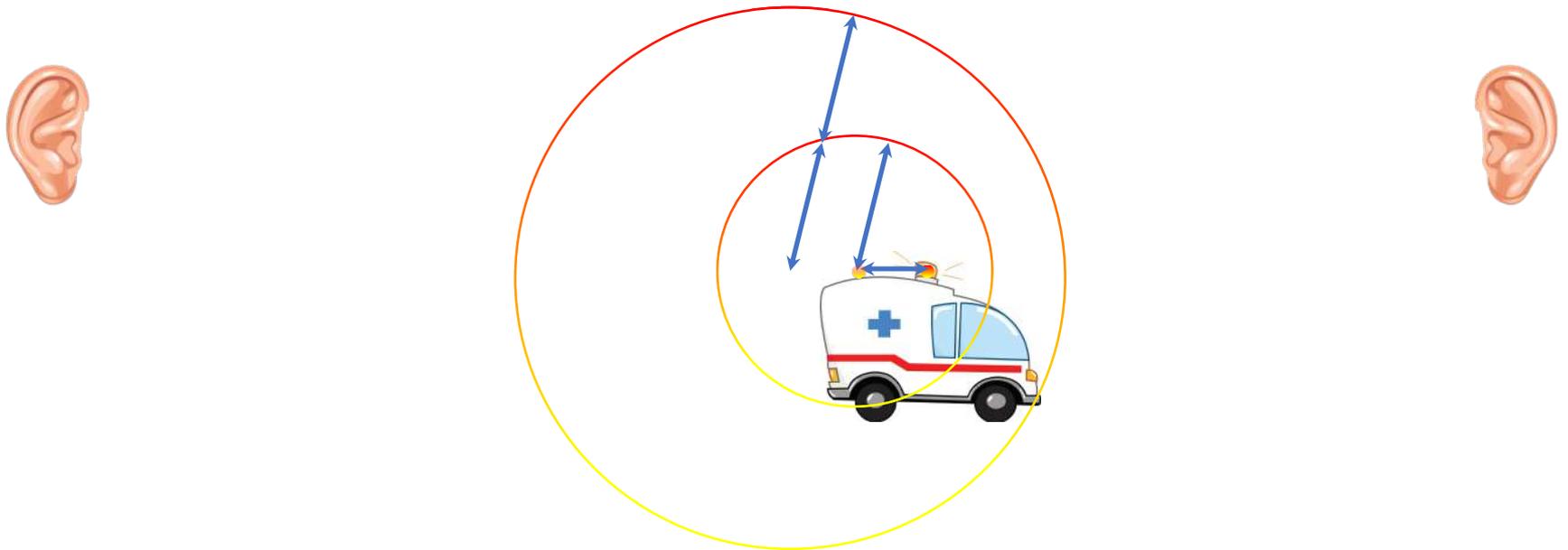
Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance V_a
- Après un temps t ,
 - l'ambulance avance de $V_a * t$
 - Le front de pression avance de $V_s * t$



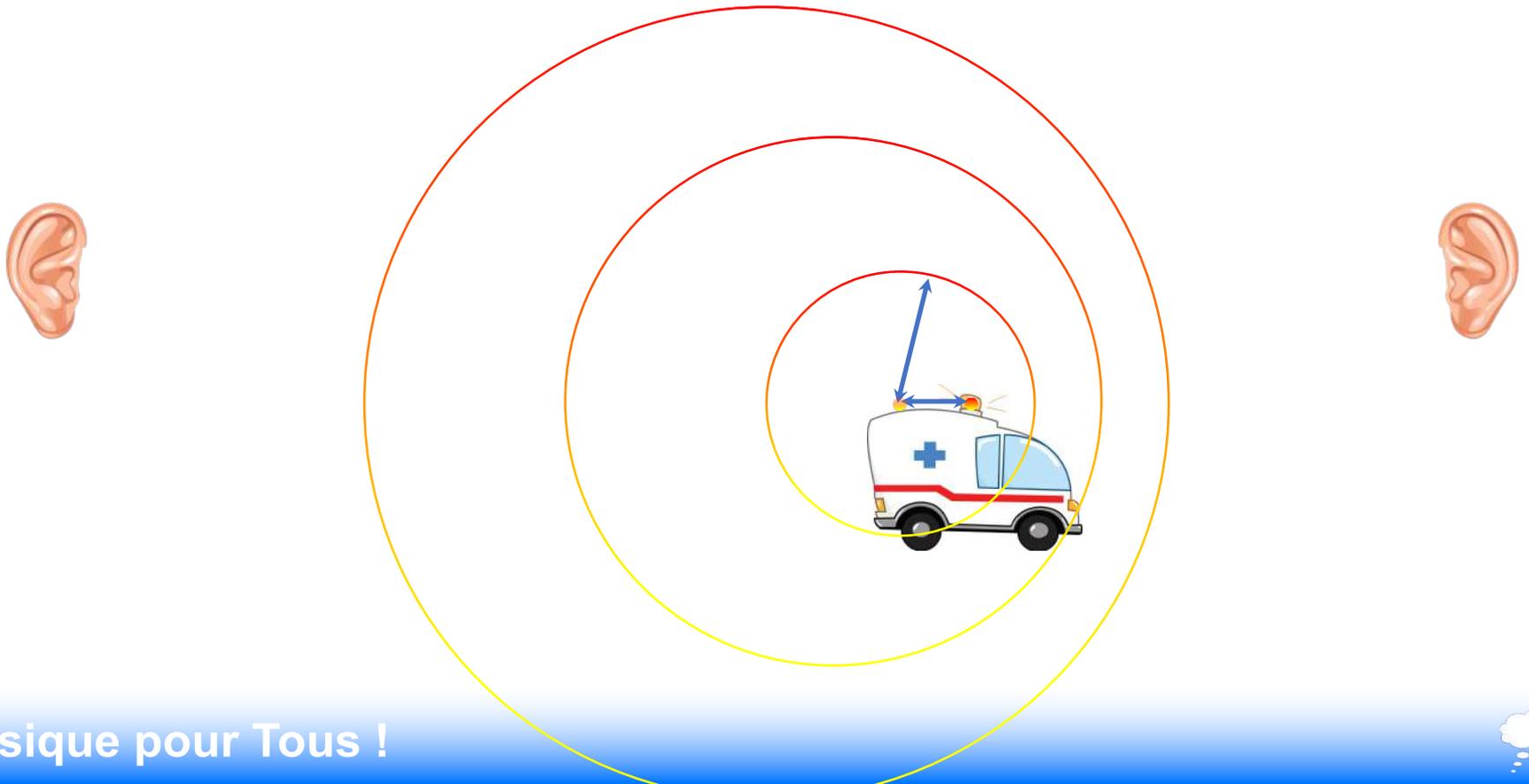
Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance : V_a
- Après un temps $2t...$



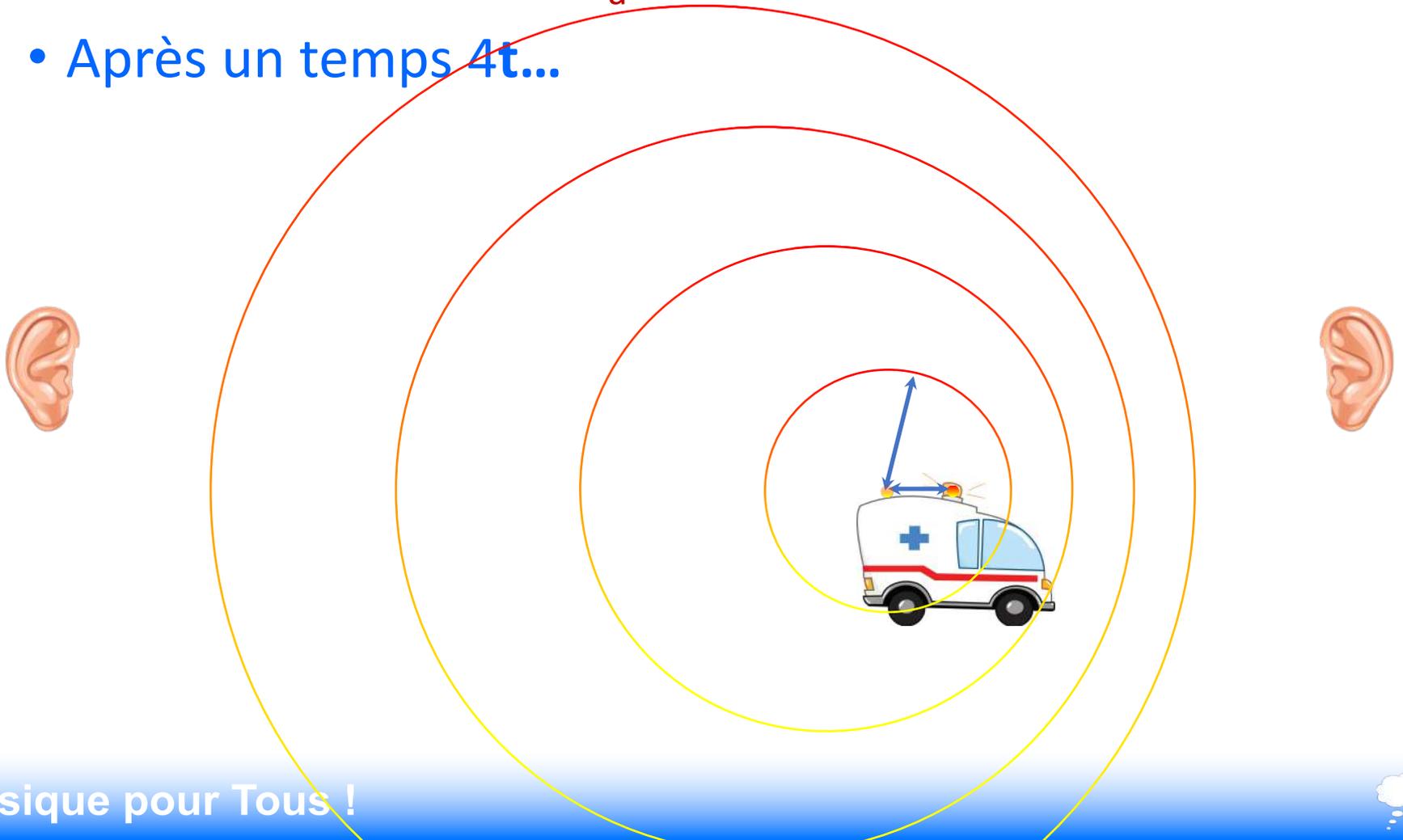
Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance : V_a
- Après un temps $3t...$



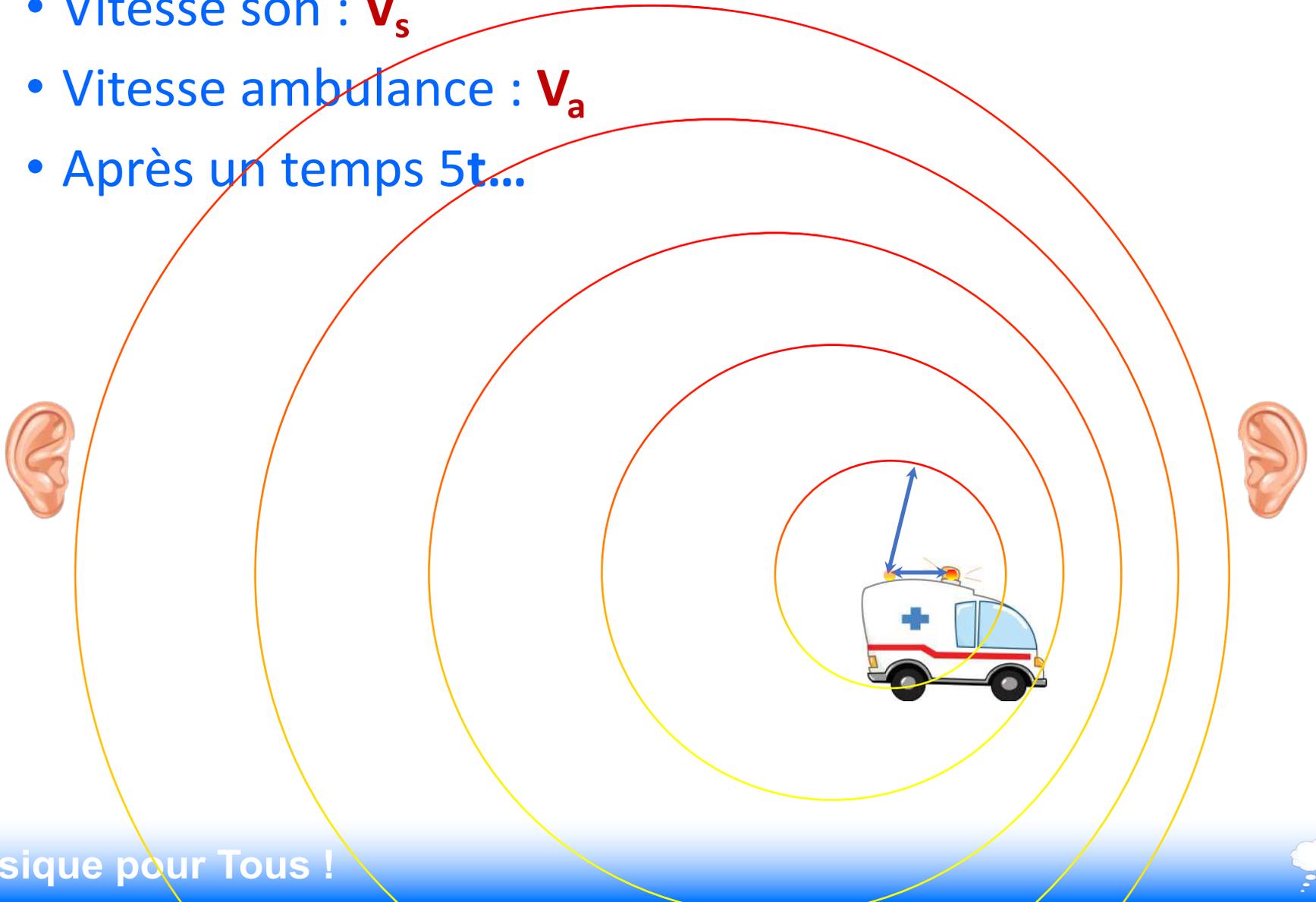
Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance : V_a
- Après un temps $4t...$



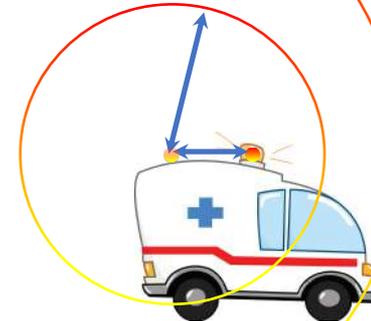
Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance : V_a
- Après un temps $5t...$



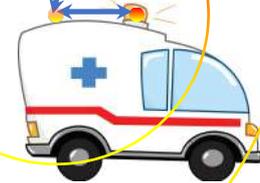
Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance : V_a
- Après un temps $6t...$

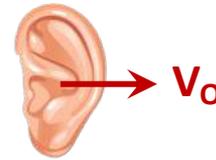
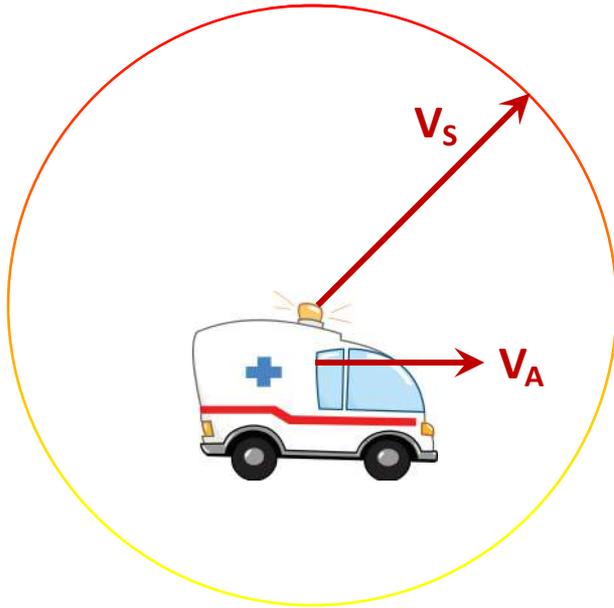


Effet Doppler

- Vitesse son : V_s
- Vitesse ambulance : V_a
- Après un temps $7t...$



Effet Doppler (en physique classique)

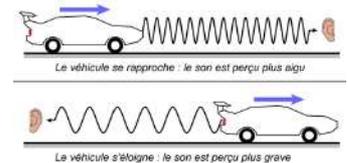


• La fréquence observée vaut : $f_O = (1 - V_O/V_S)/(1 - V_A/V_S) * f_A$

• $V_O = 0 \rightarrow f_O = f_A/(1 - V_A/V_S)$

• $V_A = 0 \rightarrow f_O = (1 - V_O/V_S) * f_A$

• $V_O = V_A \rightarrow f_O = f_A$

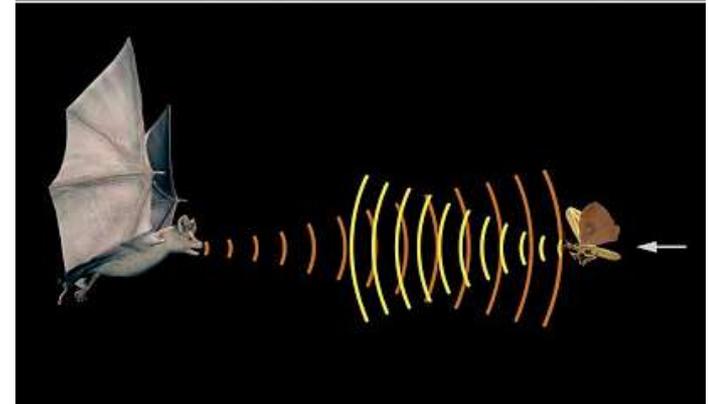


Effet Doppler (la chauve souris)

- $f_o = (1 - V_o/V_s)/(1 - V_A/V_s) * f_A$

- V_A = vitesse chauve souris ~ 30 km/h
- V_o = vitesse insecte ~ -20 km/h
- V_s = vitesse du son ~ 340 m/s ~ 1224 km/h

→ $f_o/f_A = 1,04\dots$ Si $f_A = 100\ 000$ Hz, $f_o = 104\ 000$ Hz



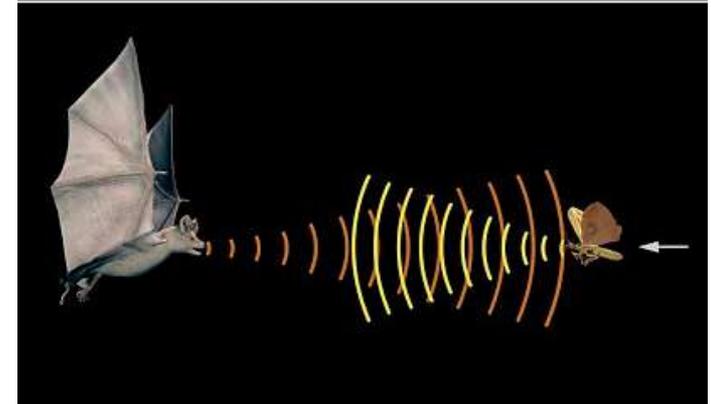
Effet Doppler (la chauve souris)

- $f_o = (1 - V_o/V_s)/(1 - V_A/V_s) * f_A$

- V_A = vitesse chauve souris ~ 30 km/h
- V_o = vitesse insecte ~ -20 km/h
- V_s = vitesse du son ~ 340 m/s ~ 1224 km/h

→ $f_o/f_A = 1,04...$ Si $f_A = 100\ 000$ Hz, $f_o = 104\ 000$ Hz

- On pouvait s'y attendre car
 - $V_o/V_s \sim 1,6\%$,
 - $V_A/V_s \sim 2,4\%$
 - En sommant on obtient $\sim 4\%$



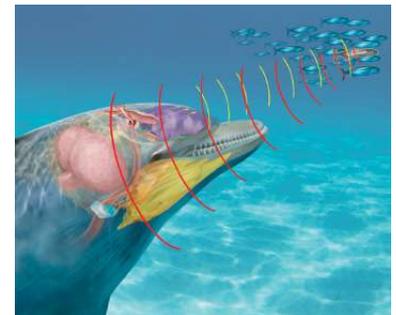
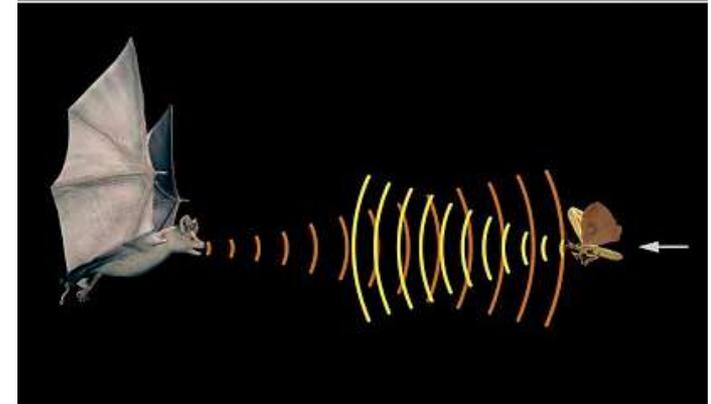
Effet Doppler (la chauve souris)

- $f_o = (1 - V_o/V_s)/(1 - V_A/V_s) * f_A$

- V_A = vitesse chauve souris ~ 30 km/h
- V_o = vitesse insecte ~ -20 km/h
- V_s = vitesse du son ~ 340 m/s ~ 1224 km/h

→ $f_o/f_A = 1,04...$ Si $f_A = 100\ 000$ Hz, $f_o = 104\ 000$ Hz

- Pour le dauphin, la vitesse du son dans l'eau ~ 5400 km/h
 - $V_o/V_s \sim \cancel{1,6\%} \rightarrow 0,37\%$
 - $V_A/V_s \sim \cancel{2,4\%} \rightarrow 0,55\%$
 - En sommant on obtient $\sim \cancel{4\%} \rightarrow 0,93\%$



Effet Doppler (la chauve souris)

- $f_o = (1 - V_o/V_s)/(1 - V_A/V_s) * f_A$

- V_A = vitesse chauve souris ~ 30 km/h

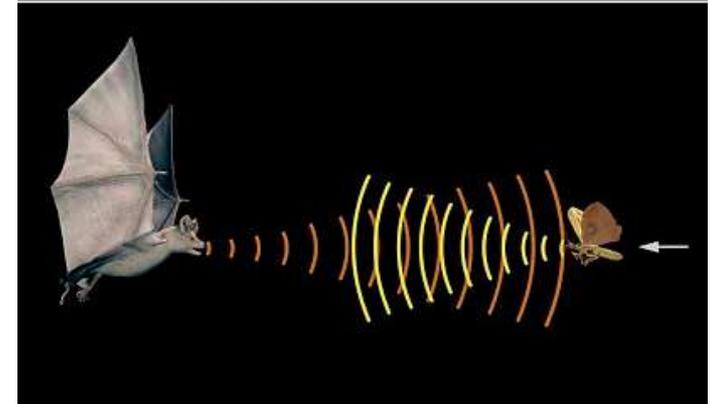
- V_o = vitesse insecte ~ -20 km/h

- V_s = vitesse du son ~ 340 m/s ~ 1224 km/h

→ $f_o/f_A = 1,04...$ Si $f_A = 100\ 000$ Hz, $f_o = 104\ 000$ Hz

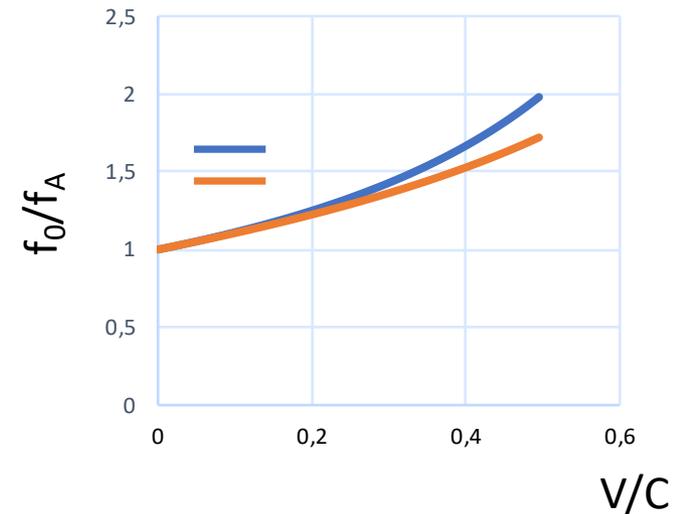
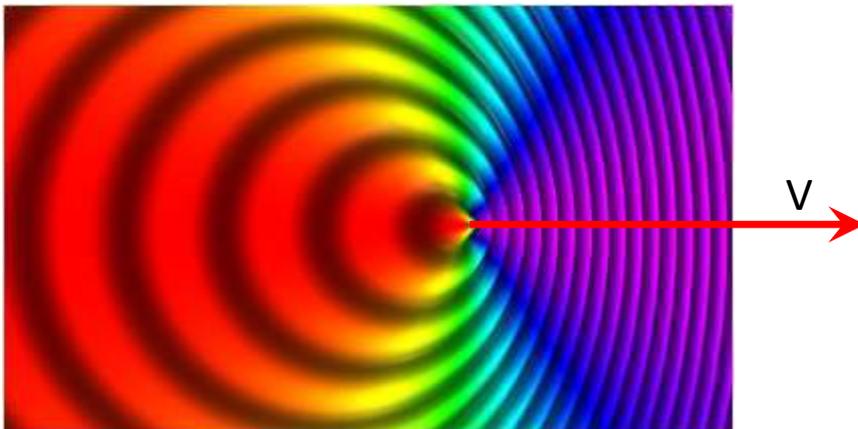
- C'est la fréquence reçue et réfléchiée par le papillon... Il faut recommencer le même travail pour l'onde retour !

→ $f_{\text{écho}}/f_{\text{émis}} = 1.08$



Effet Doppler, correction relativiste

- En physique classique
 - $f_O = (1 - V_O/V_S)/(1 - V_A/V_S) * f_A$
- Pour la lumière, en prenant en compte la relativité :
 - On note $V = V_A - V_O$; $V_S = C$ (vitesse lumière)
 - $f_O = \text{racine} [(1 - V/c)/(1 + V/c)] * f_A$



Effet Doppler et astronomie

- Si une source lumineuse s'éloigne de nous, sa lumière est décalée vers le rouge (on parle de « redshift »).
- Si la source s'approche, sa lumière est décalée vers le bleu.



Effet Doppler et astronomie

- Si une source lumineuse s'éloigne de nous, sa lumière est décalée vers le rouge (on parle de « redshift »).
- Si la source s'approche, sa lumière est décalée vers le bleu.

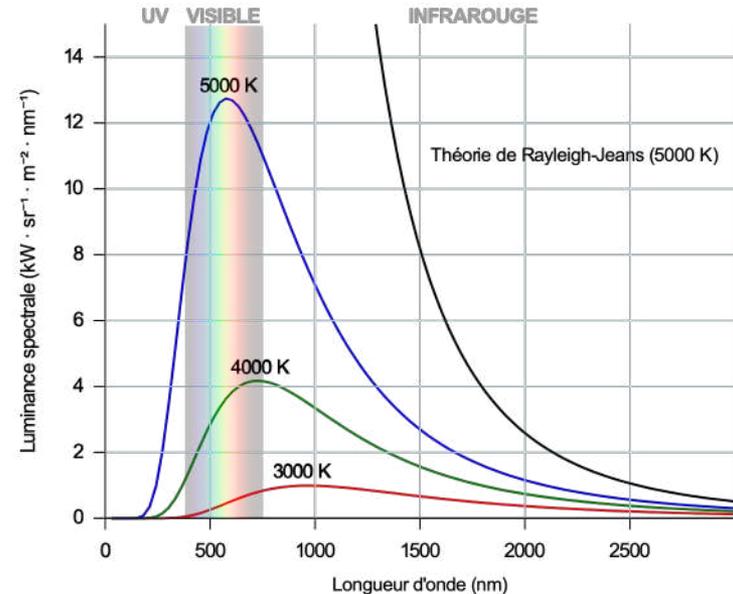


➔ Mais la couleur d'une étoile est insuffisante pour déterminer sa vitesse !!!

Effet Doppler et astronomie

- Rappel sur le rayonnement du corps noir

→ Les étoiles chaudes émettent plus de bleu que les froides



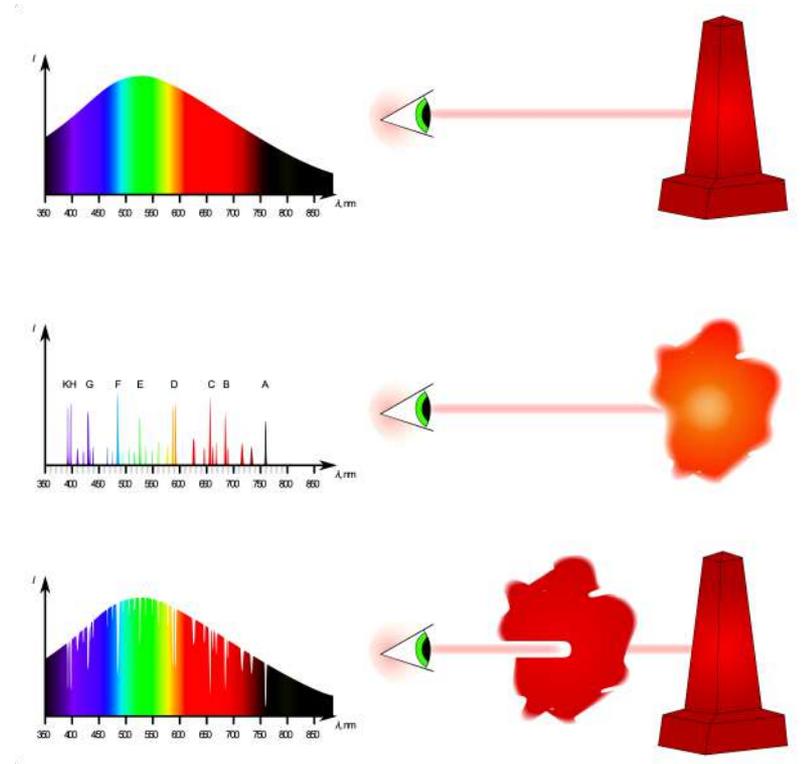
Par Darth Kule —

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body.svg, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=49865103>

Effet Doppler et astronomie

- Rappel sur les observations de Kirchhoff (1859-60)
 - Un solide, un liquide ou un gaz dense, excité pour émettre de la lumière, rayonnera toutes les longueurs d'onde et produira un spectre continu
 - Un gaz de faible densité, excité pour émettre de la lumière, rayonnera à des longueurs d'onde précises et formera un spectre d'émission discret
 - Un gaz froid de faible densité, traversé par un rayonnement de spectre continu absorbera des longueurs d'onde précises.



Esmu Igors, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Kirchhof_laws.svg

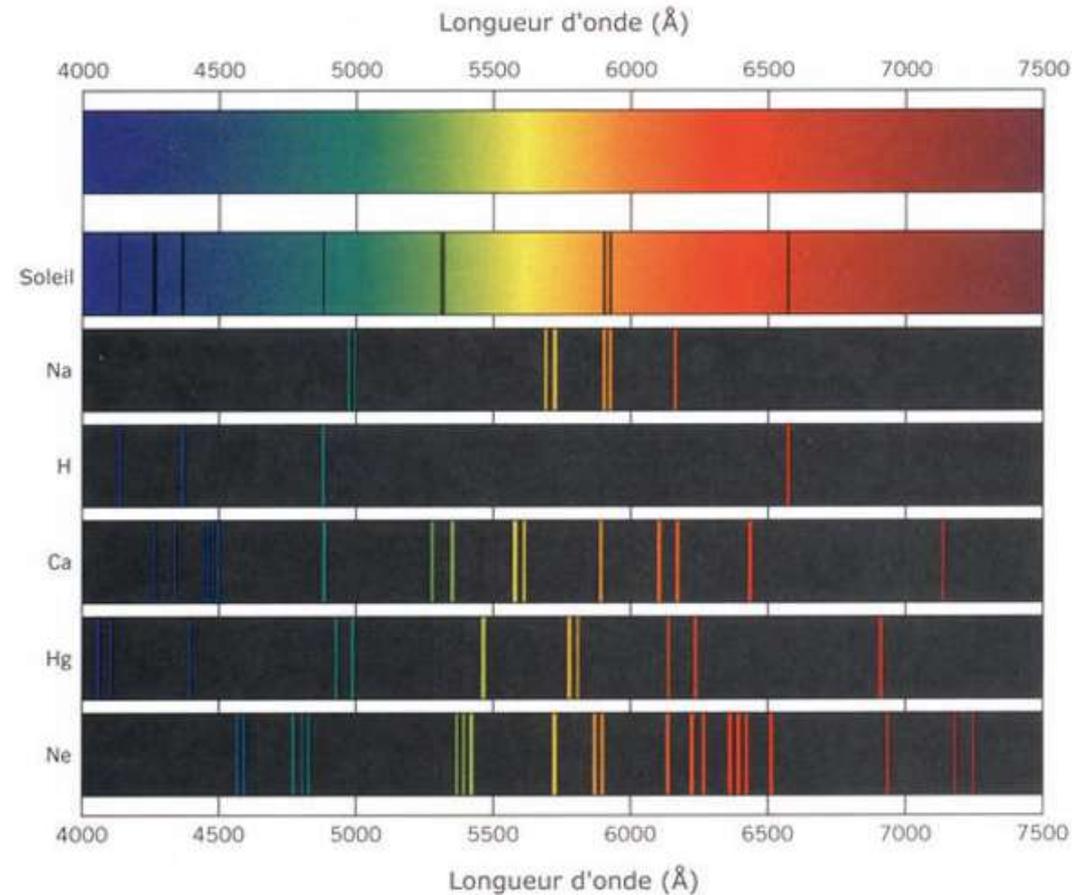
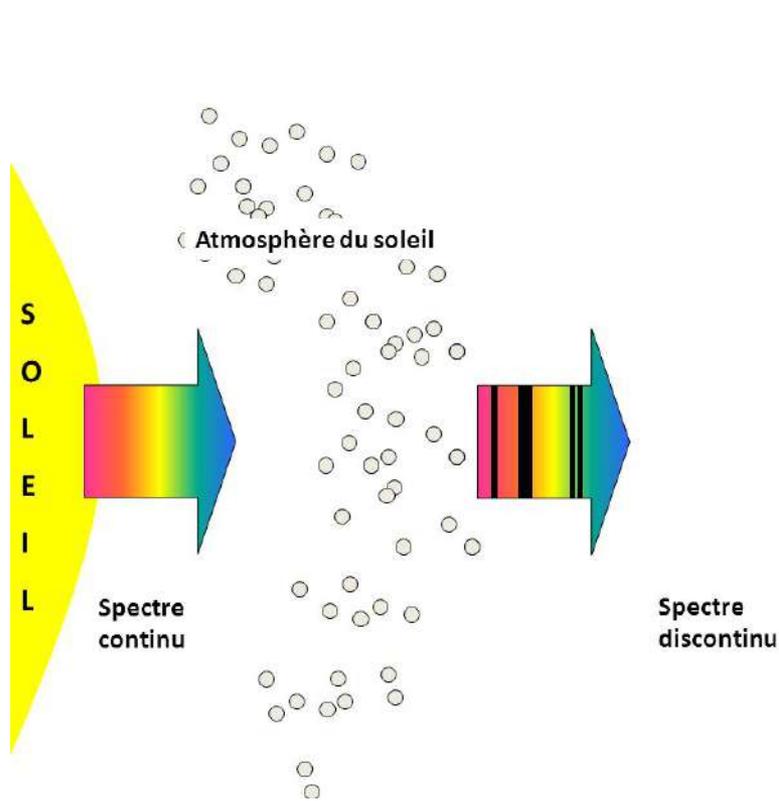
Effet Doppler et astronomie

- Rappel sur la découverte du professeur Calys
 - Grâce à l'observation des raies absorbées par le gaz autour de l'étoile mystérieuse, **le professeur Calys découvre le Calystène**



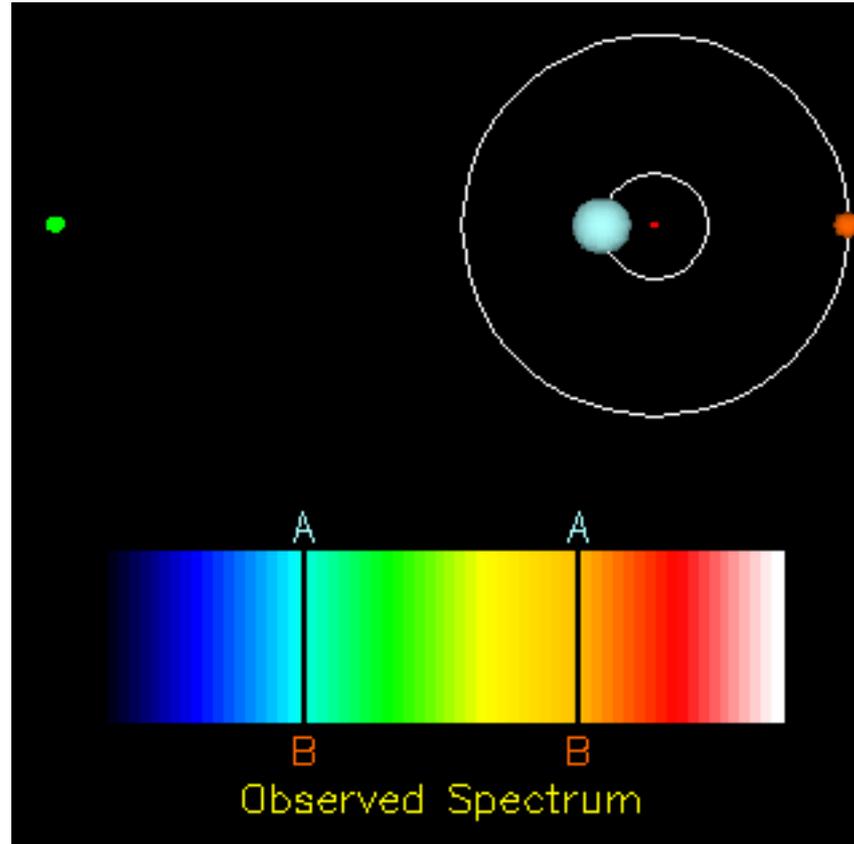
Effet Doppler et astronomie

- L'exemple du soleil



Effet Doppler et astronomie

- Détermination de la vitesse des corps célestes



Effet Doppler et astronomie

- Mesure de vitesses

- La vitesse Transverse v_T

- Étoile de Barnard (source wikipedia) :

- Distance : 5,96 années lumières (AL)

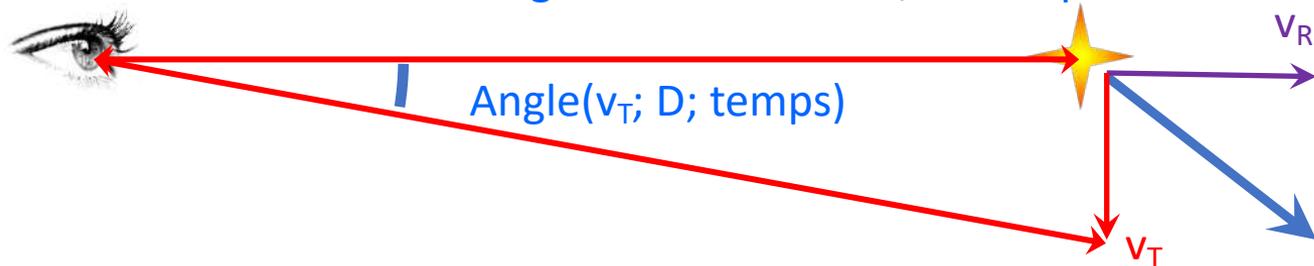
- v_T : 89,6 km/s

- Angle (89,6 km/s; 5,96 AL; 1 an) $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ radians

- La position de l'étoile change de 5 micro-radians par an

- C'est comme si un avion à 10 km d'altitude bougeait de 0,5 m par an..

- Ou si vous bougiez votre main à 0,05 mm par an



Effet Doppler et astronomie

- Mesure de vitesses

- La vitesse Radiale v_R

- Étoile de Barnard (source wikipedia) :

- Distance : 5,96 années lumières (AL)

- v_T : 89,6 km/s

- v_R : -106,8 km/s

- Variation de fréquence attendue: $(f_o = \text{racine}[(1-v_R/c)/(1+v_R/c)] * f_A)$

- 0,03 %

- La fréquence du spectre visible est d'environ 10^{14} Hz

- → variation attendue de $\sim 3 \cdot 10^9$ Hz (gamme des micro-ondes)



Conclusion

- Nous avons vu de nombreuses propriétés des ondes
 - Comment elles se propagent, s'additionnent, se réfléchissent...
 - Le phénomène de résonance et d'onde stationnaire
 - Une explication de la dépendance de l'indice de réfraction
 - Différents types de polarisation
 - L'effet doppler
- La semaine prochaine, j'aborderai la matière. Comment elle interagit. Le lien entre onde et particule pour accéder à une vision dynamique de la matière.