

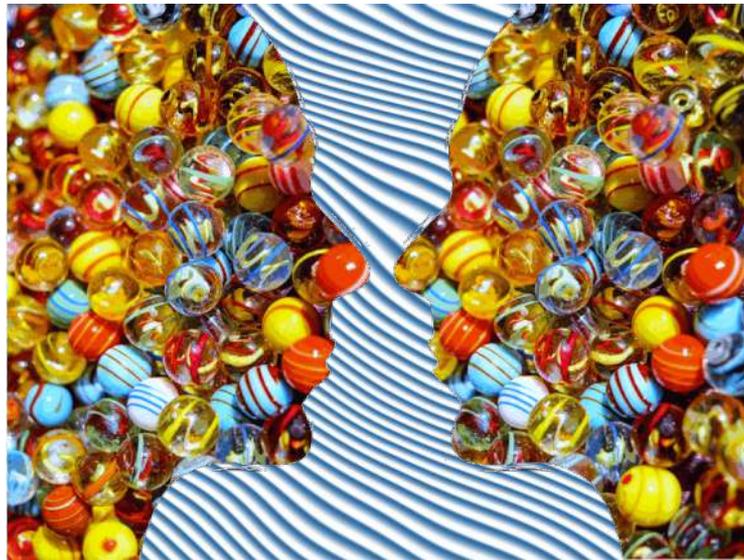


# Physique pour Tous !

Site web : <http://physiquepourtous.unistra.fr>  
Mail: [physiquepourtous@unistra.fr](mailto:physiquepourtous@unistra.fr)

# Cours 4 – Lumière & Matière

## Onde ou Particule ?



**Mardi 14 Mai – Amphi. Fresnel (Institut de Physique)**  
**18h30 → 20h - Ouvert à tous, entrée libre & gratuite**

# But et plan de ce cours

---

- **Développer une nouvelle intuition de ce qu'est la matière**
  - Résumé du cours précédent
    - Développement de la notion de **champ**
    - Rappel de la méthode d'addition des ondes
  - Plongée dans la matière
  - Détour par la lumière
    - La lumière est une onde
      - Expérience de Thomas Young
      - Diffraction
      - Maxwell
    - La lumière est composée de particules
      - Effet photo-électrique
  - Retour vers la matière
    - Louis de Broglie
    - Diffraction des électrons
  - Champs et particules
  - Différent type de particules qui interagissent
    - $E = mc^2$
    - Rien ne se perd, rien ne se crée mais tout se transforme

# Résumé du cours *Ondes et lumière*

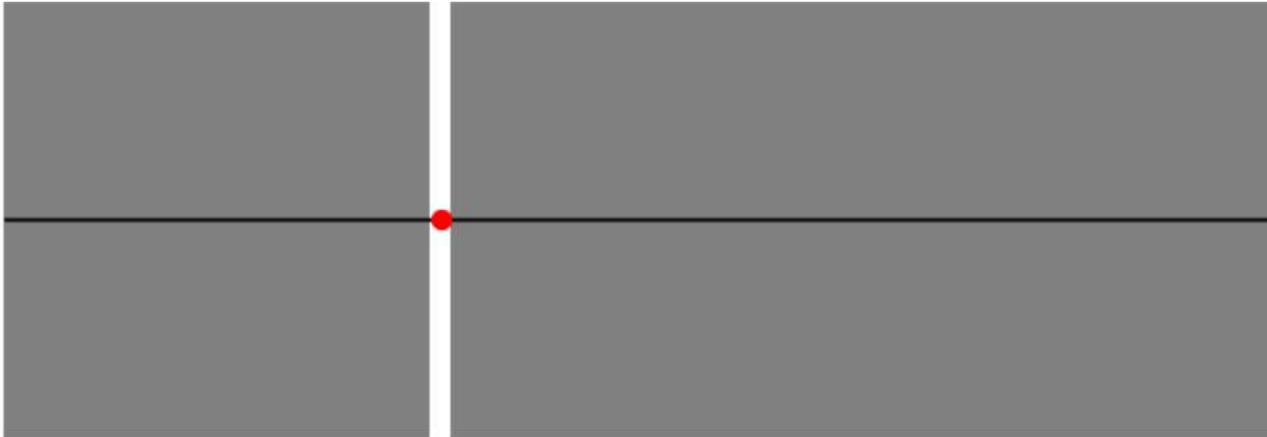
---

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

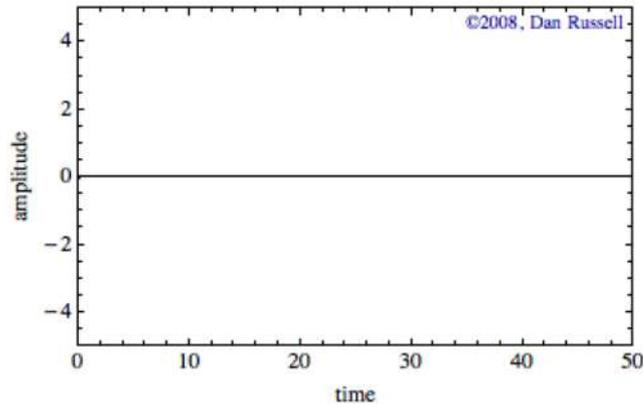


# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Sur fond gris, le mouvement de l'onde

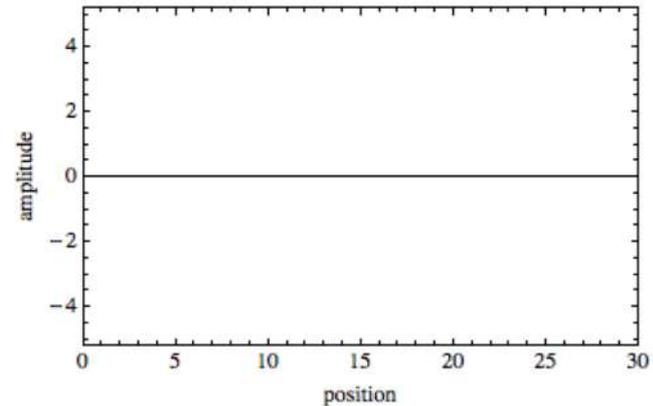


Time behavior at  $x=10.25$



Description temporelle  
Position fixe

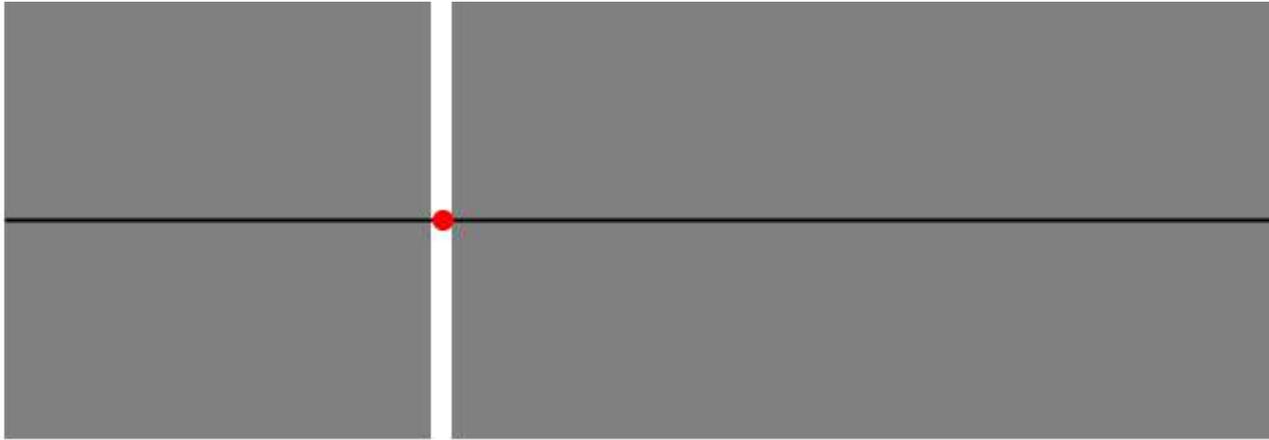
Snapshot of wave at  $t=27s$



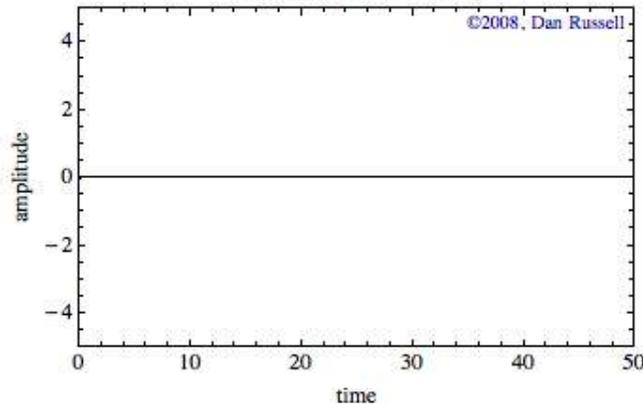
Description spatiale  
Temps fixe

# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Sur fond gris, le mouvement de l'onde

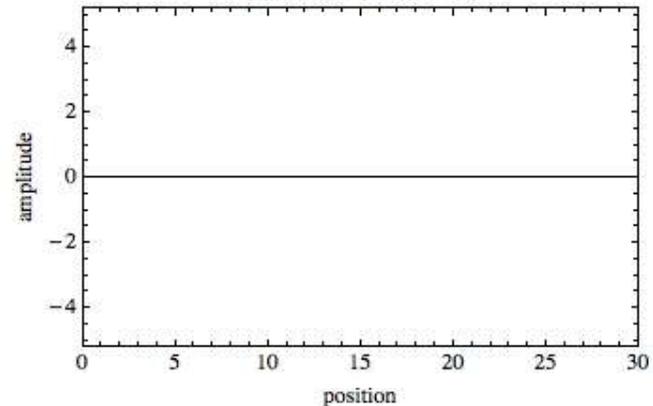


Time behavior at  $x=10.25$



Description temporelle  
Position fixe

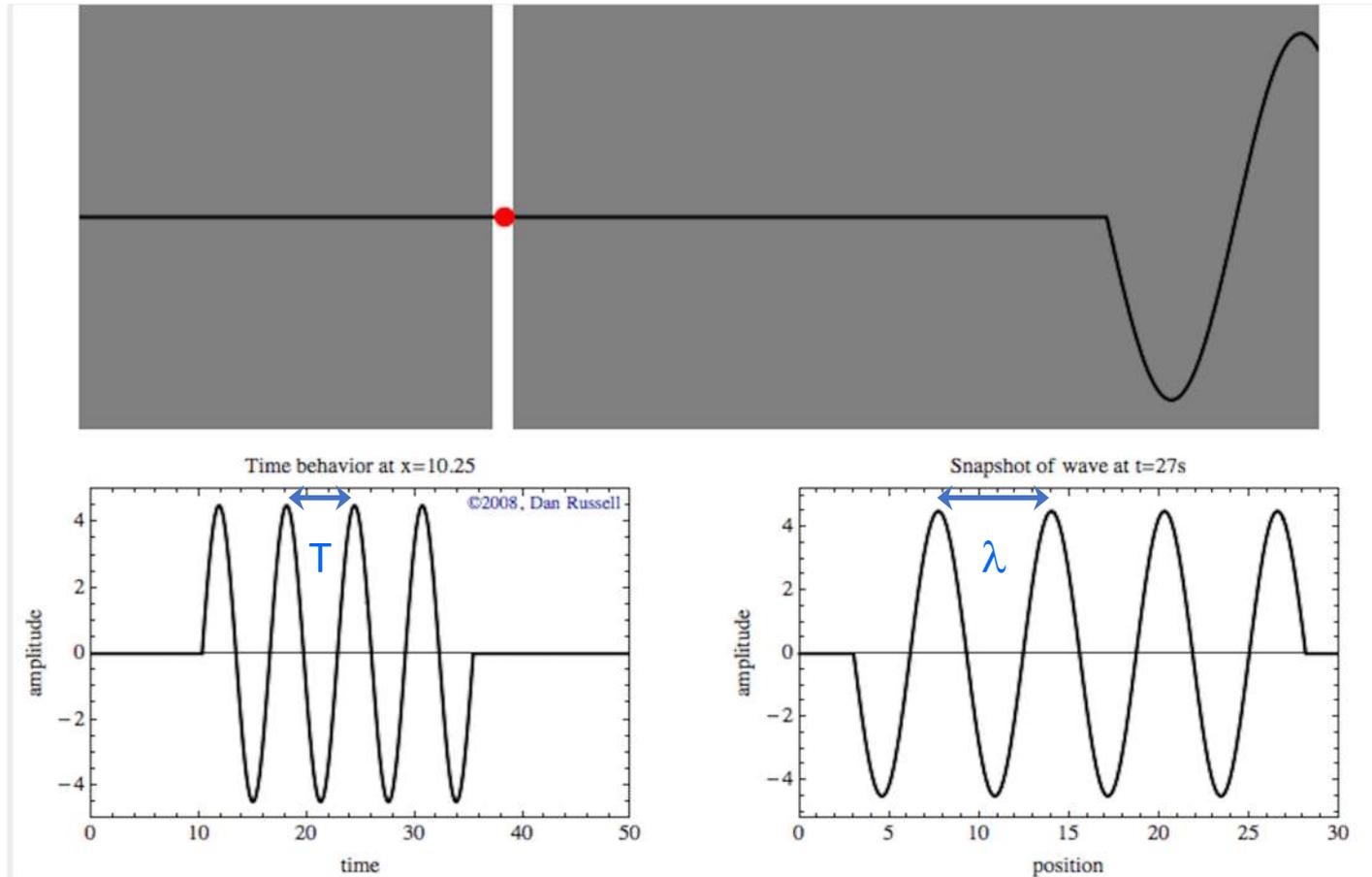
Snapshot of wave at  $t=27s$



Description spatiale  
Temps fixe

# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Sur fond gris, le mouvement de l'onde



Description temporelle  
Position fixe

Description spatiale  
Temps fixe

$$v = \lambda/T$$

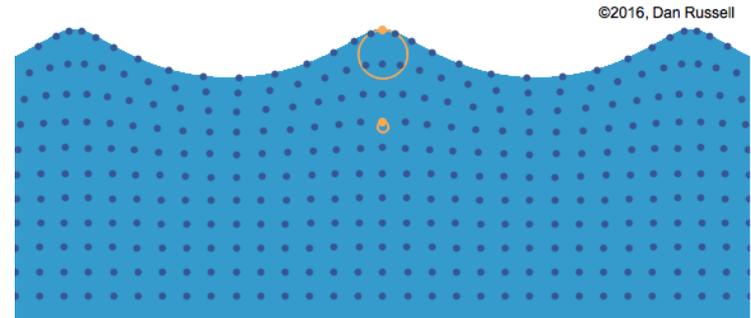
# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Le champ

- un **champ** est la donnée, pour chaque point de l'espace-temps, de la valeur d'une grandeur physique.

- Exemples

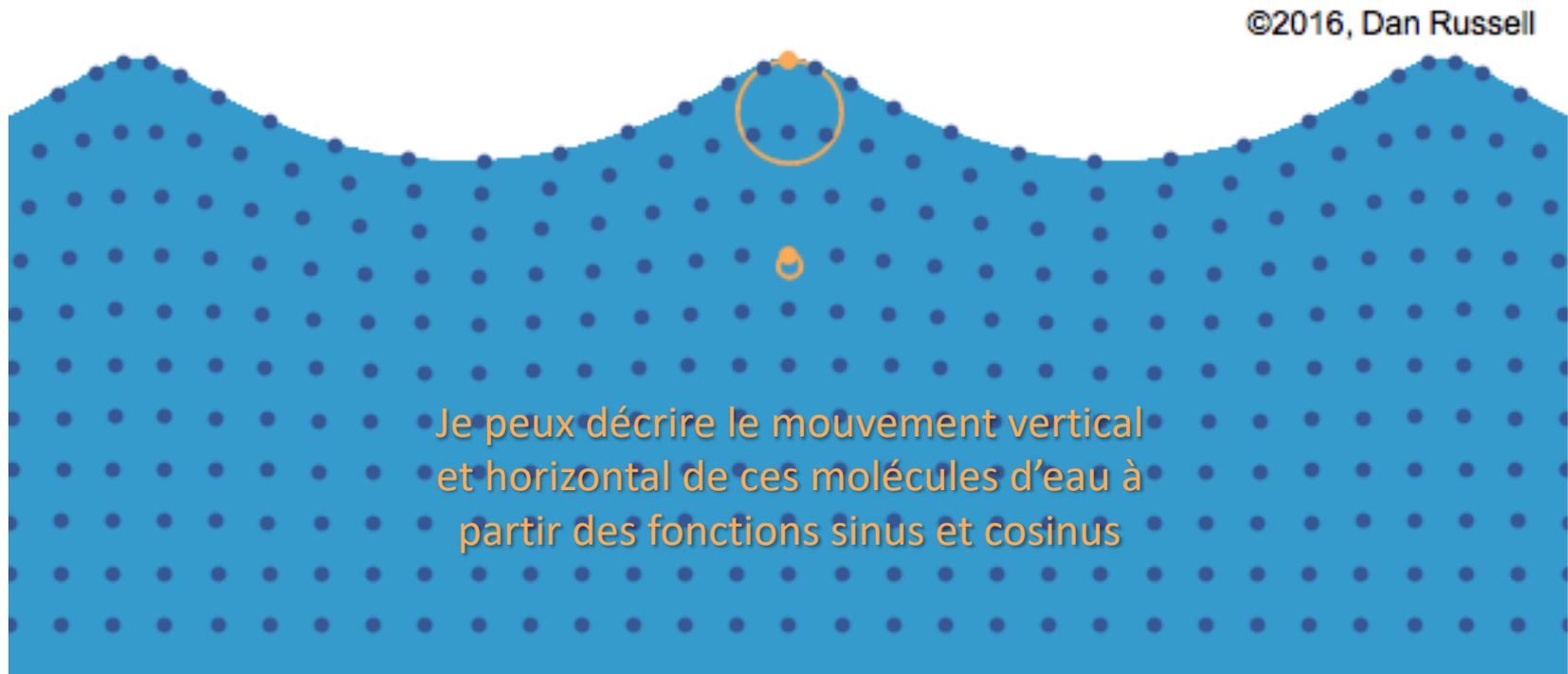
- la hauteur du liquide en chaque point d'un lac  $h(x,y,t)$
- La température
- Le champ gravitationnel
- Le champ électromagnétique



- On peut calculer l'évolution du champ en un point en fonction des valeurs du champs dans le voisinage à l'instant d'avant. On peut oublier la cause (chute d'une pierre, antenne lointaine...)
- Le champ ne nécessite pas de « support matériel »

# Résumé du cours *Ondes et lumière*

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

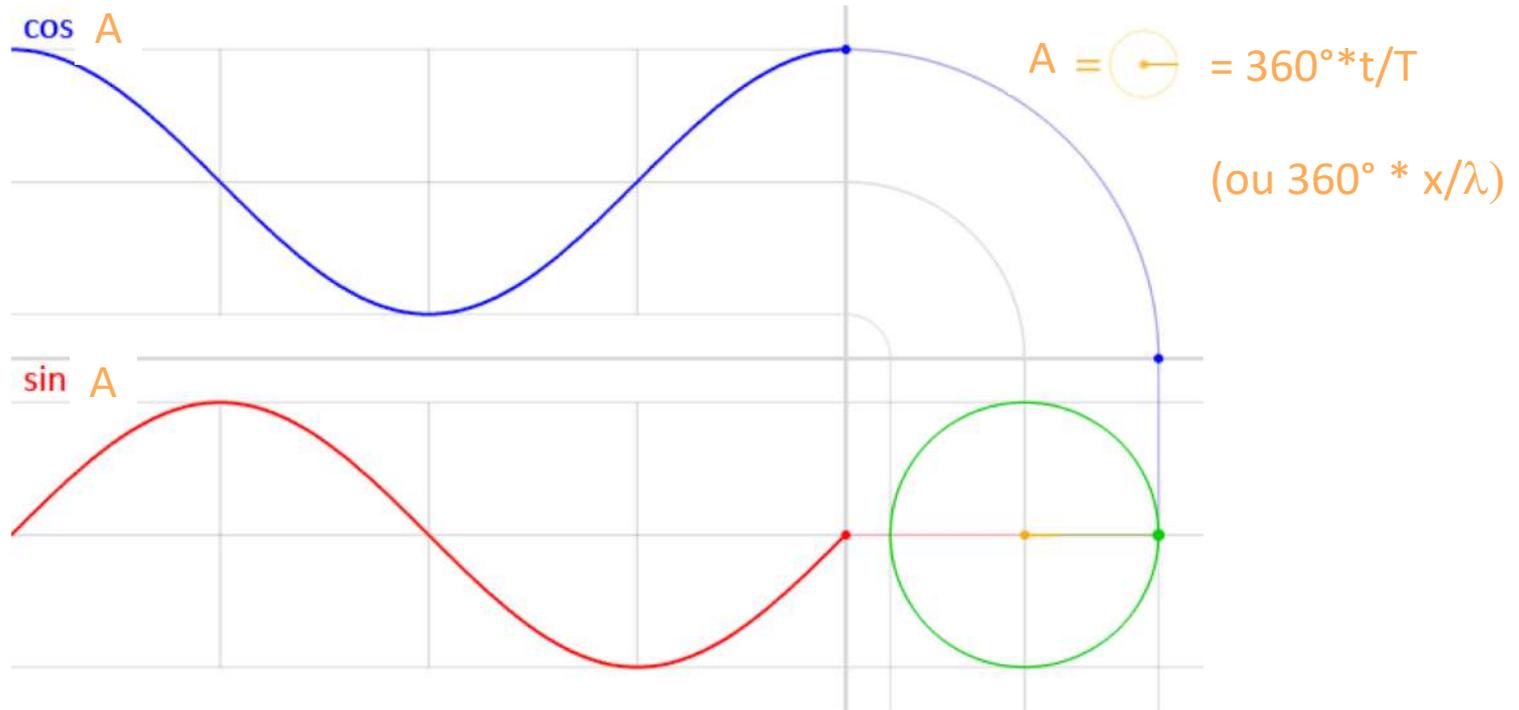


Les molécules d'eau restent quasiment sur place  
(deux exemples en orange)

L'oscillation progresse vers la droite

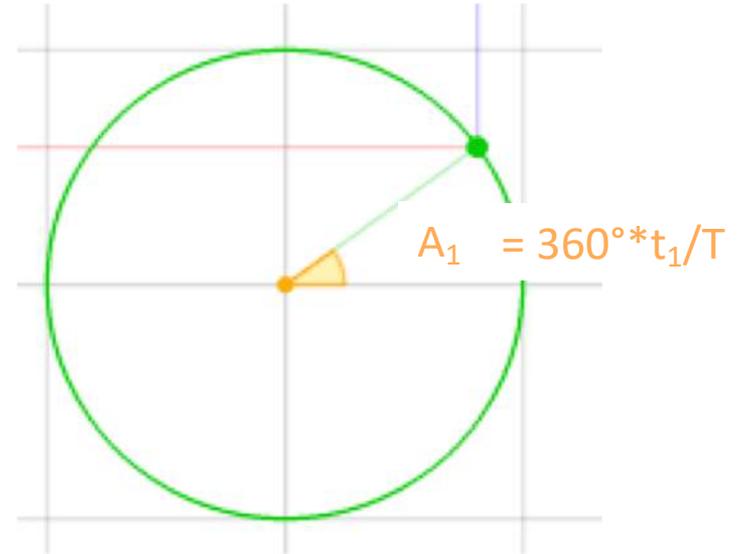
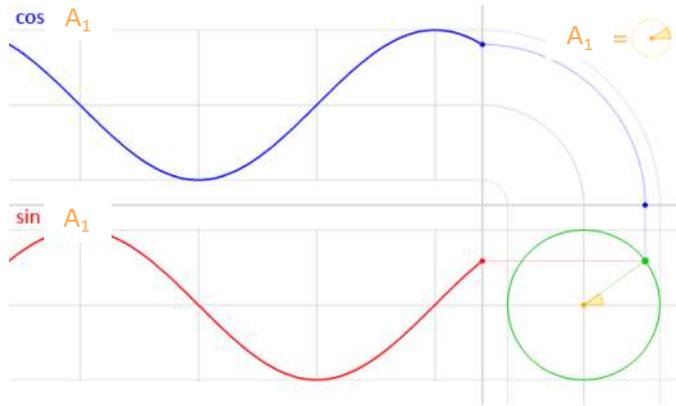
# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Les fonctions sinus et cosinus



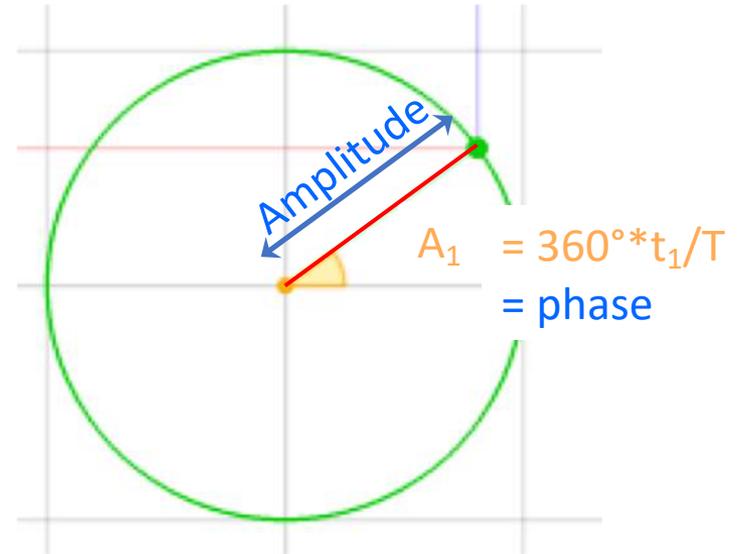
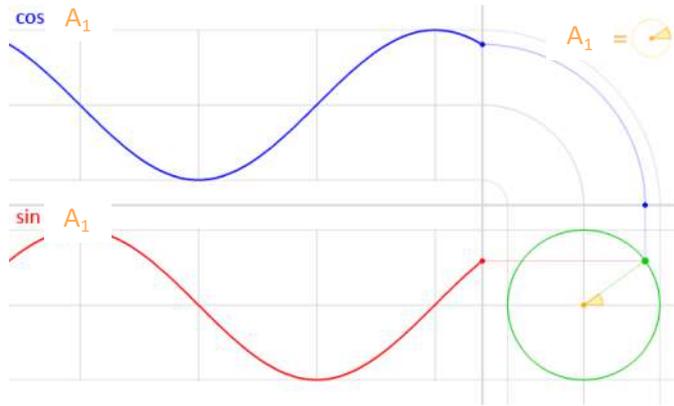
# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Représentation graphique  
(vecteur de Fresnel)



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

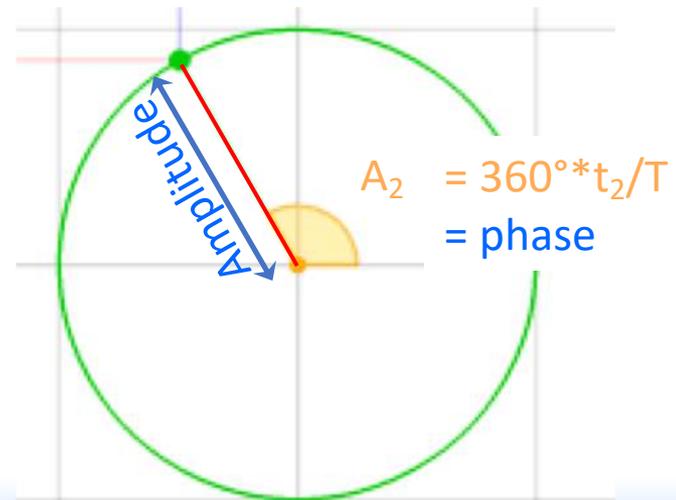
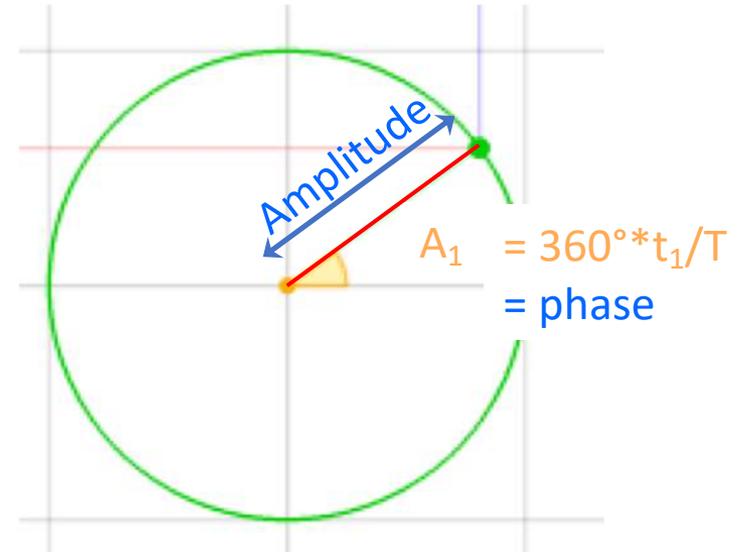
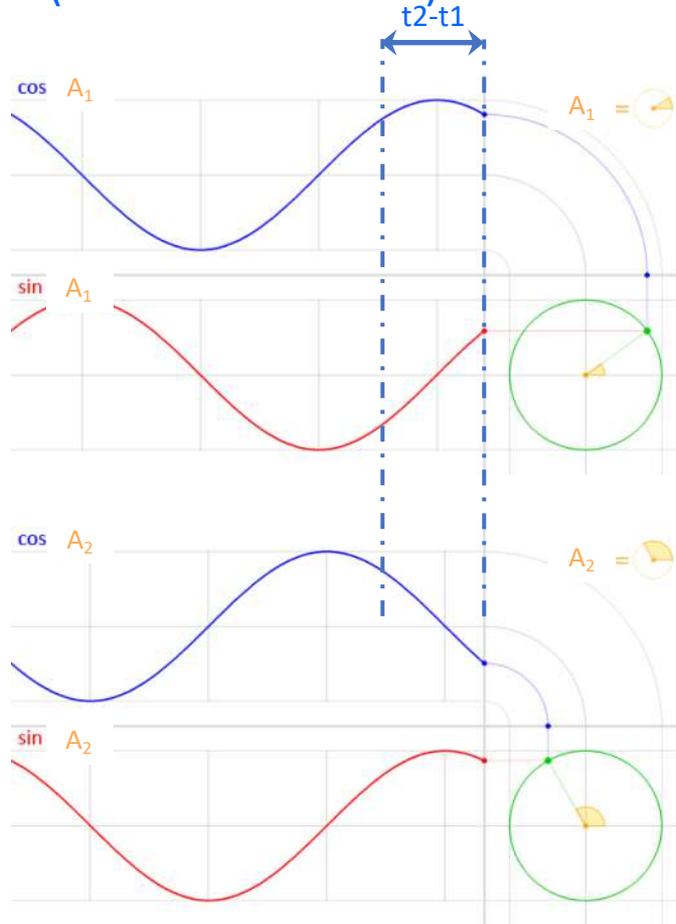
- Représentation graphique  
(vecteur de Fresnel)



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Représentation graphique

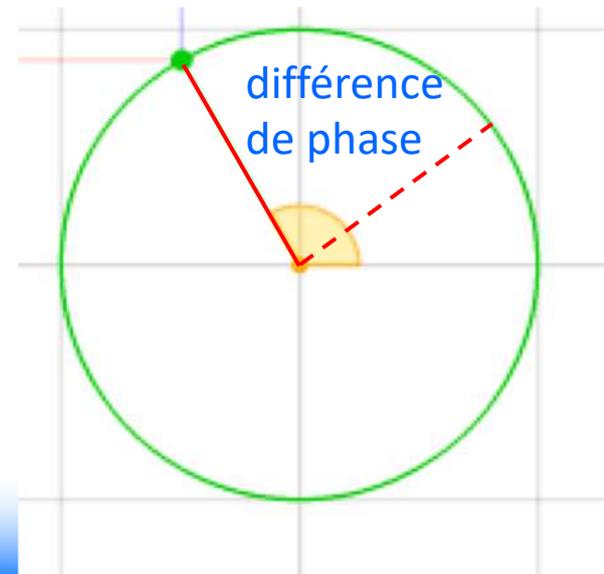
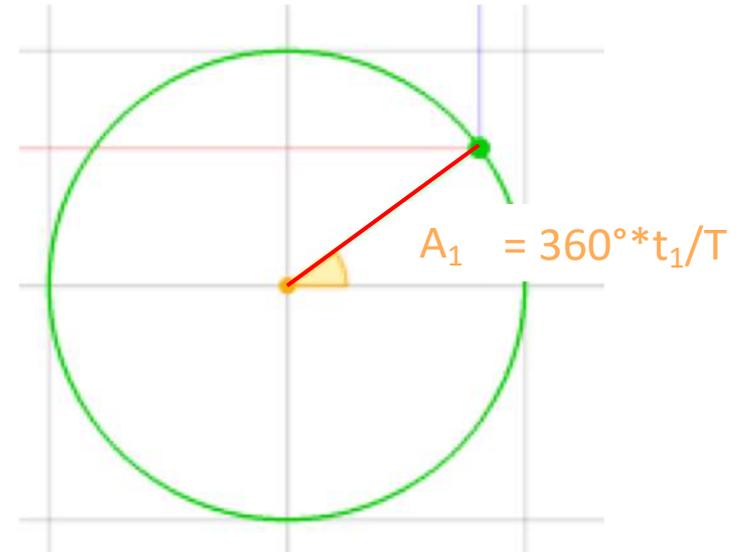
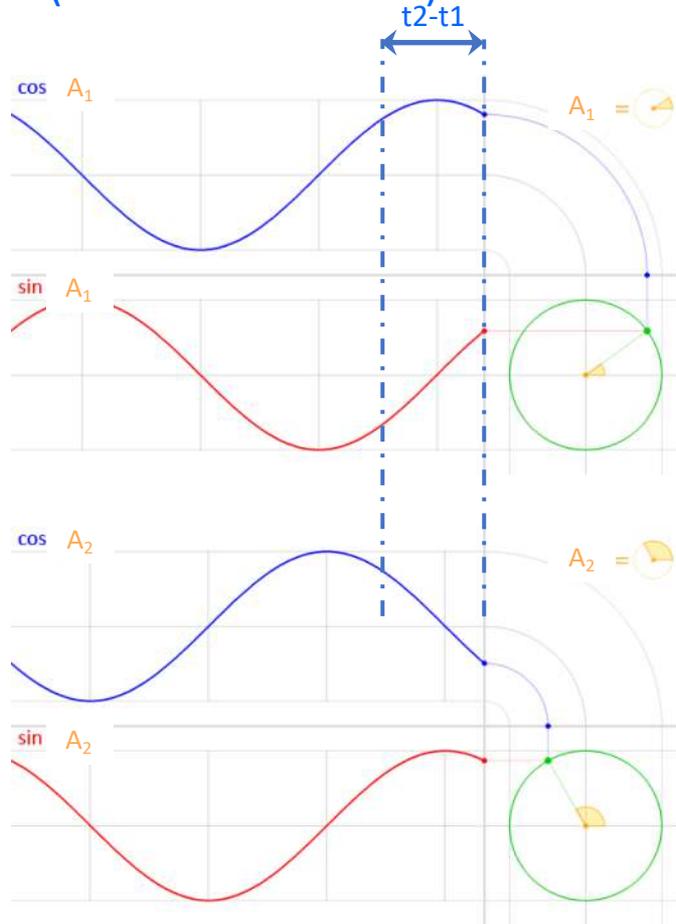
(vecteur de Fresnel)



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Représentation graphique

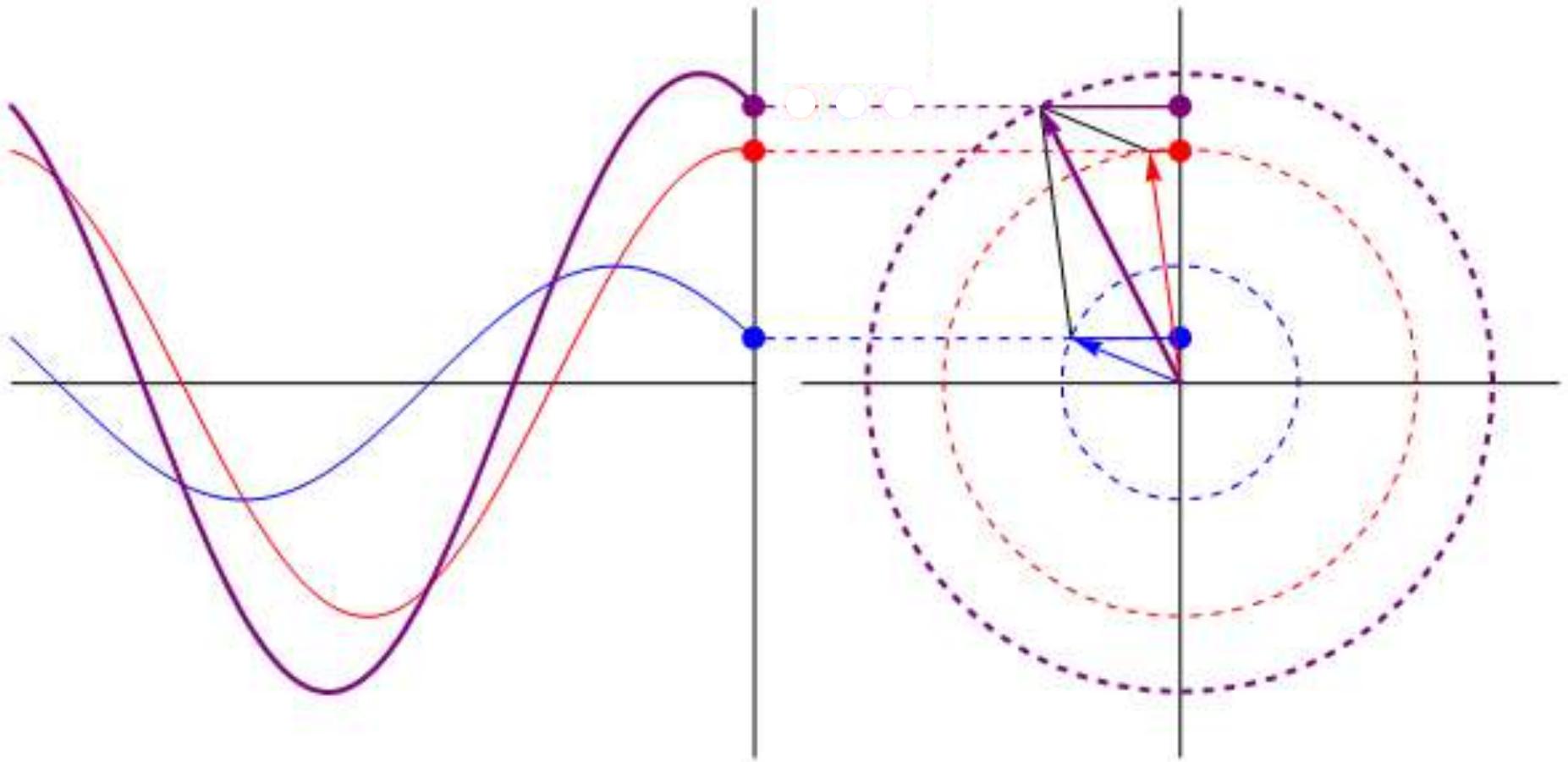
(vecteur de Fresnel)



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Addition d'onde

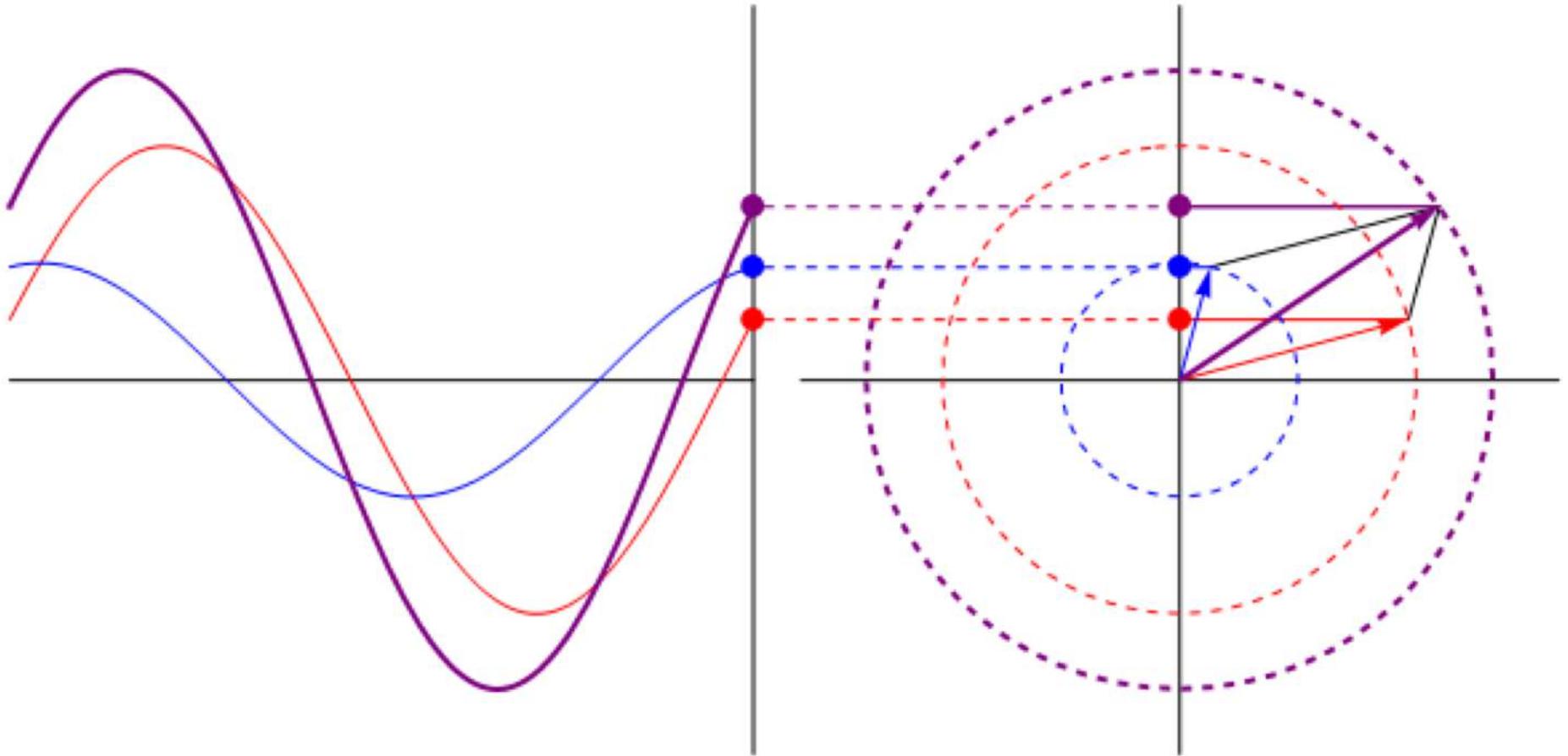
Mêmes fréquences  
Légère différence de phase



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Addition d'onde

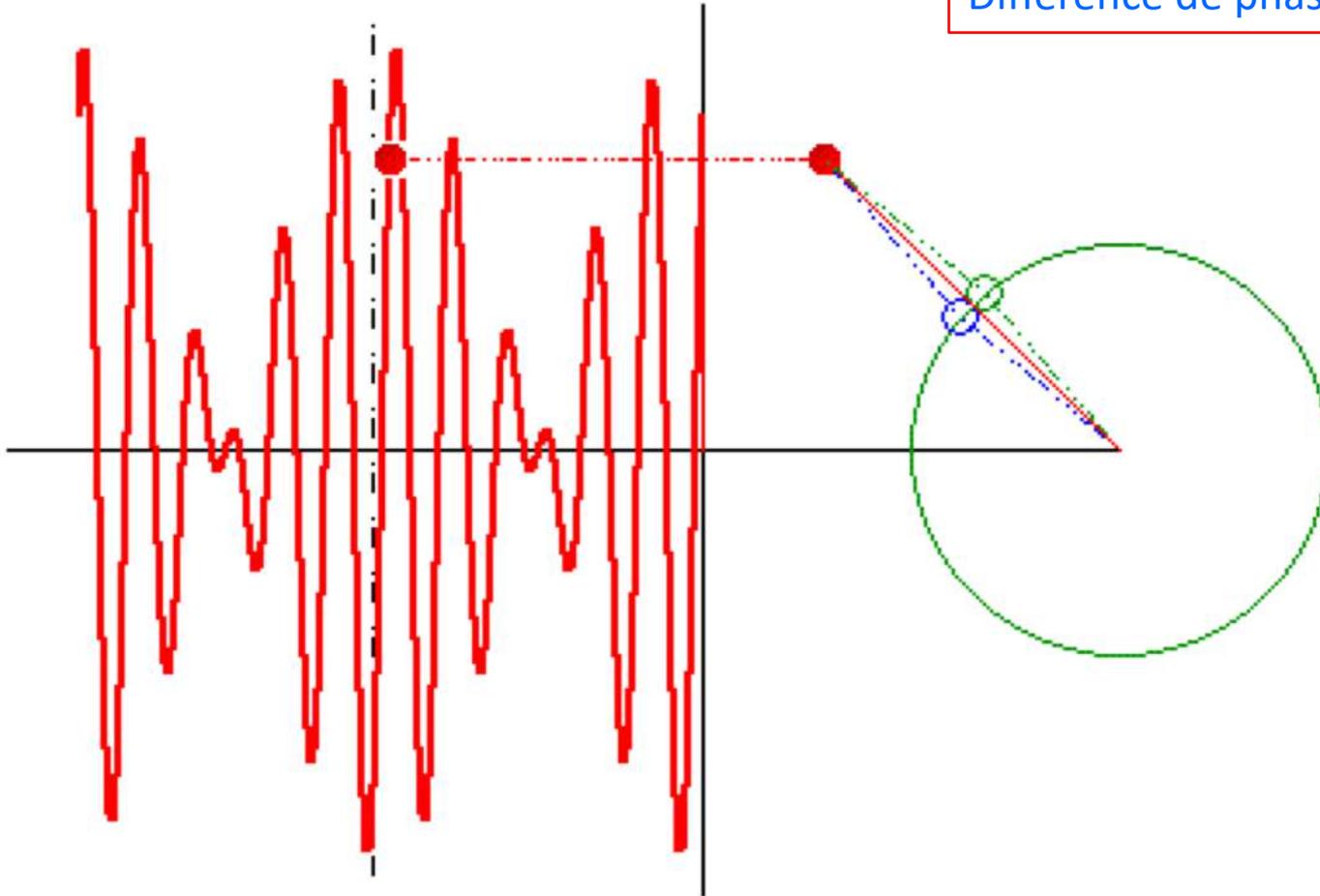
Mêmes fréquences  
Légère différence de phase



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

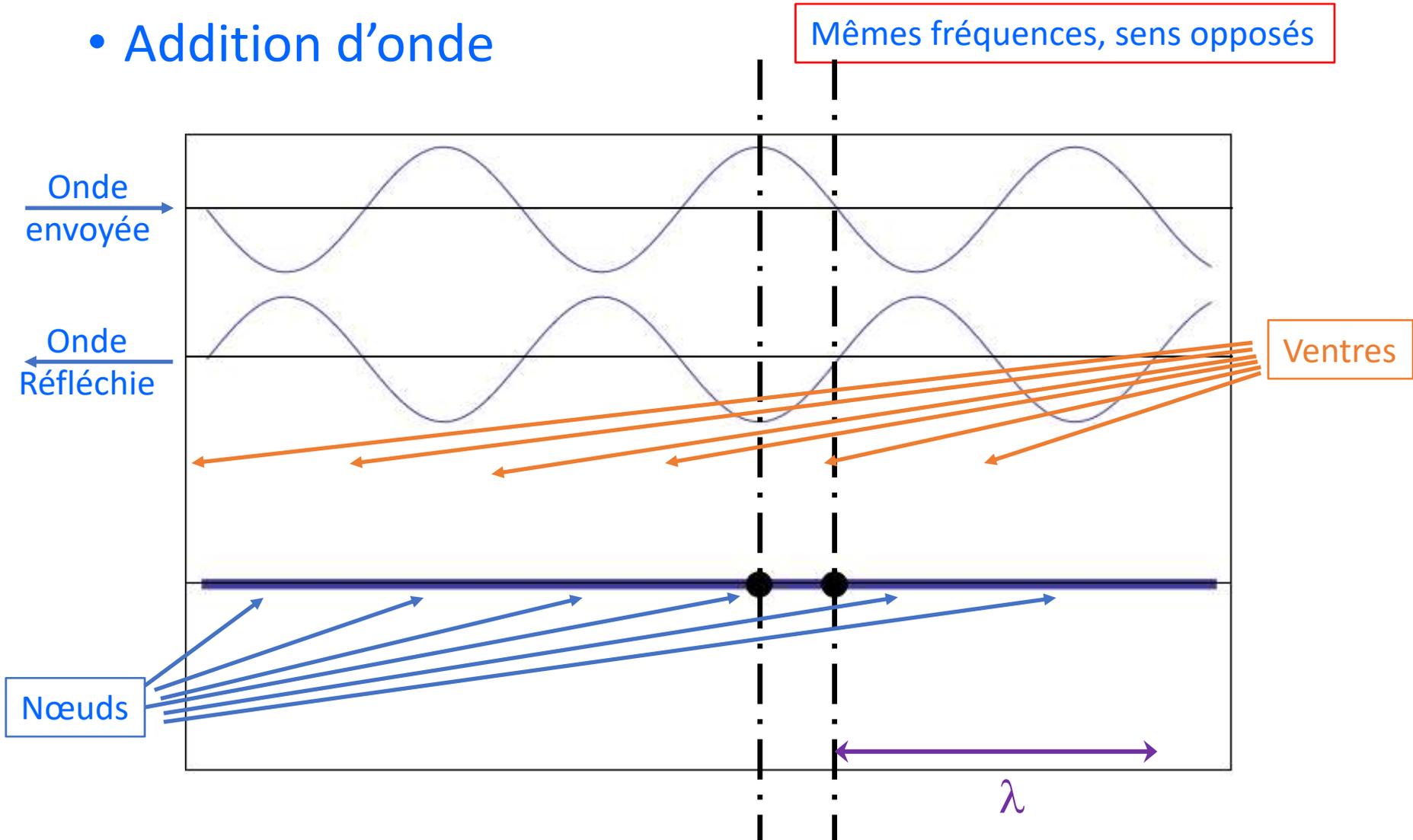
- Addition d'onde

Fréquences différentes  
Différence de phase change



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Addition d'onde



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

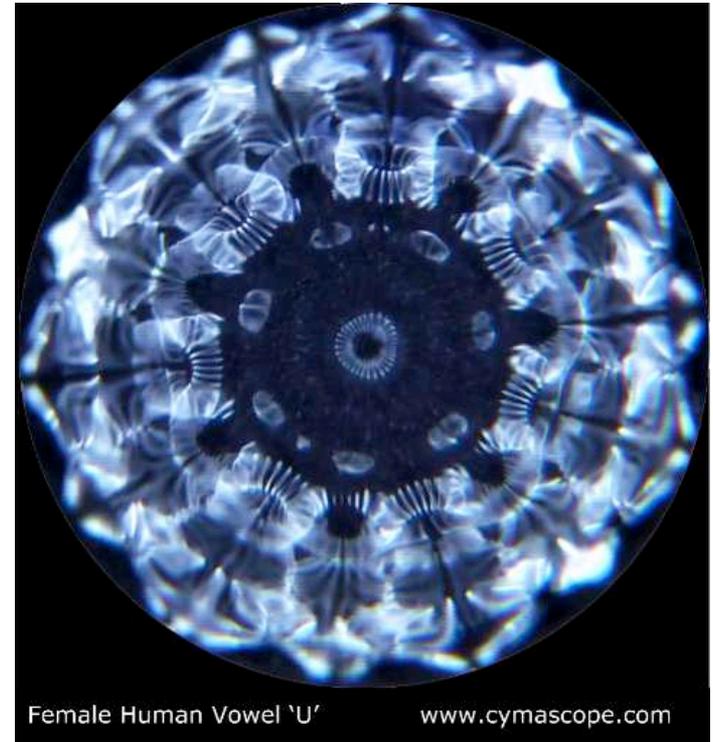
---

- Addition d'onde: cas des figures de Chladni



expérience est réalisée en salle "Sons et vibrations" du Palais de la découverte

<https://youtu.be/6kLmlbkWJZ8>

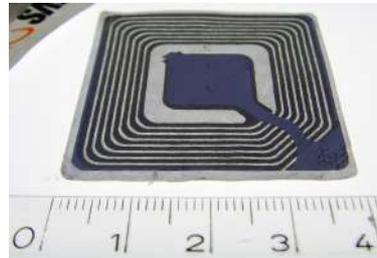


Female Human Vowel 'U'

www.cymascope.com

# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Résonance



# Résumé du cours *Ondes et lumière*

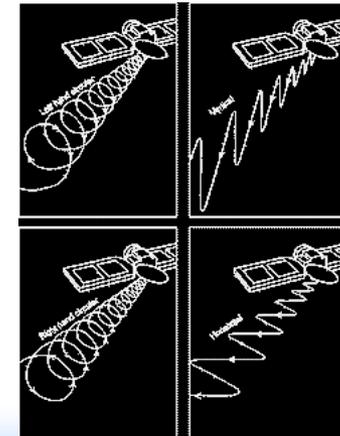
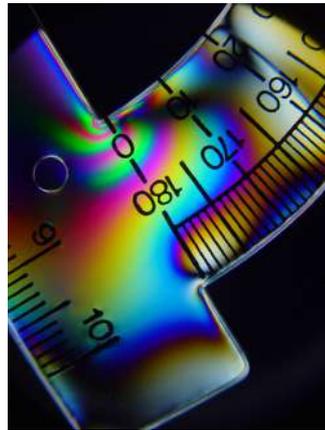
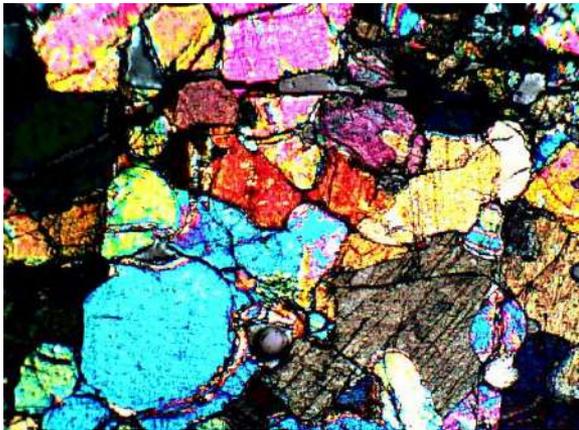
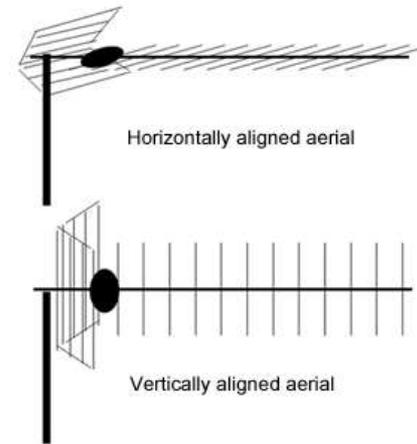
- Indice de réfraction du verre
- Polarisation



Verres solaires classiques



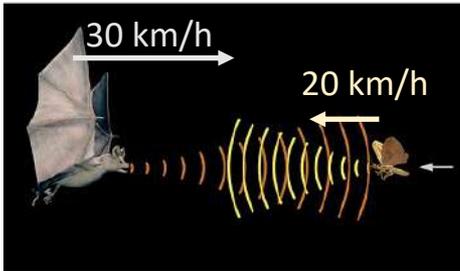
Verres solaires polarisés



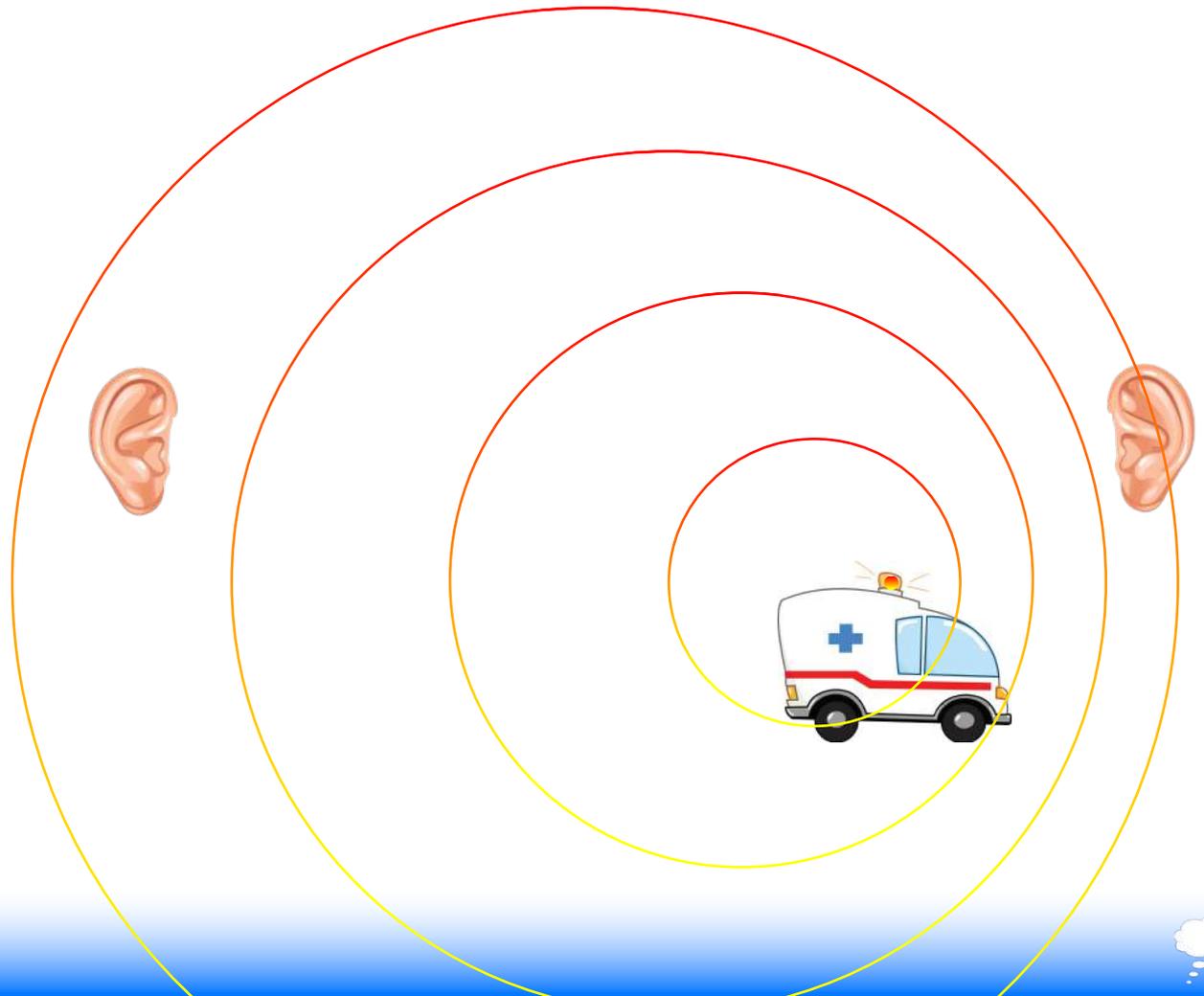
# Résumé du cours *Ondes et lumière*

- Effet Doppler:

- $f_o = (1 - v_o/v_s)/(1 - v_a/v_s) * f_A$  (son dans l'air)



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

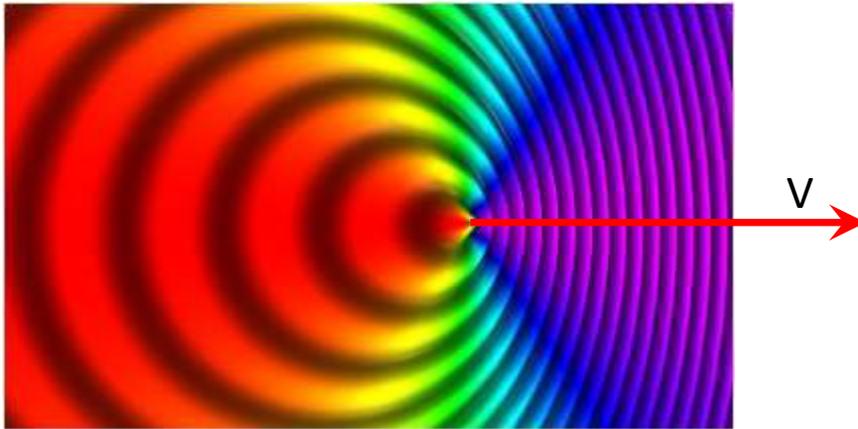


# Résumé du cours *Ondes et lumière*

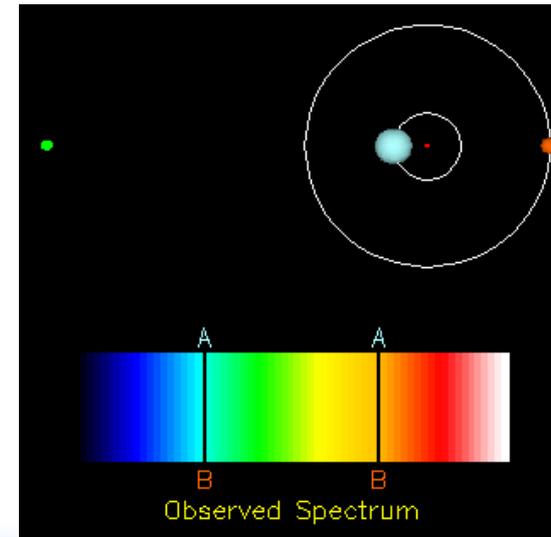
- Effet Doppler:

- $f_o = \text{racine} [ (1-V/c)/(1+V/c) ] * f_A$

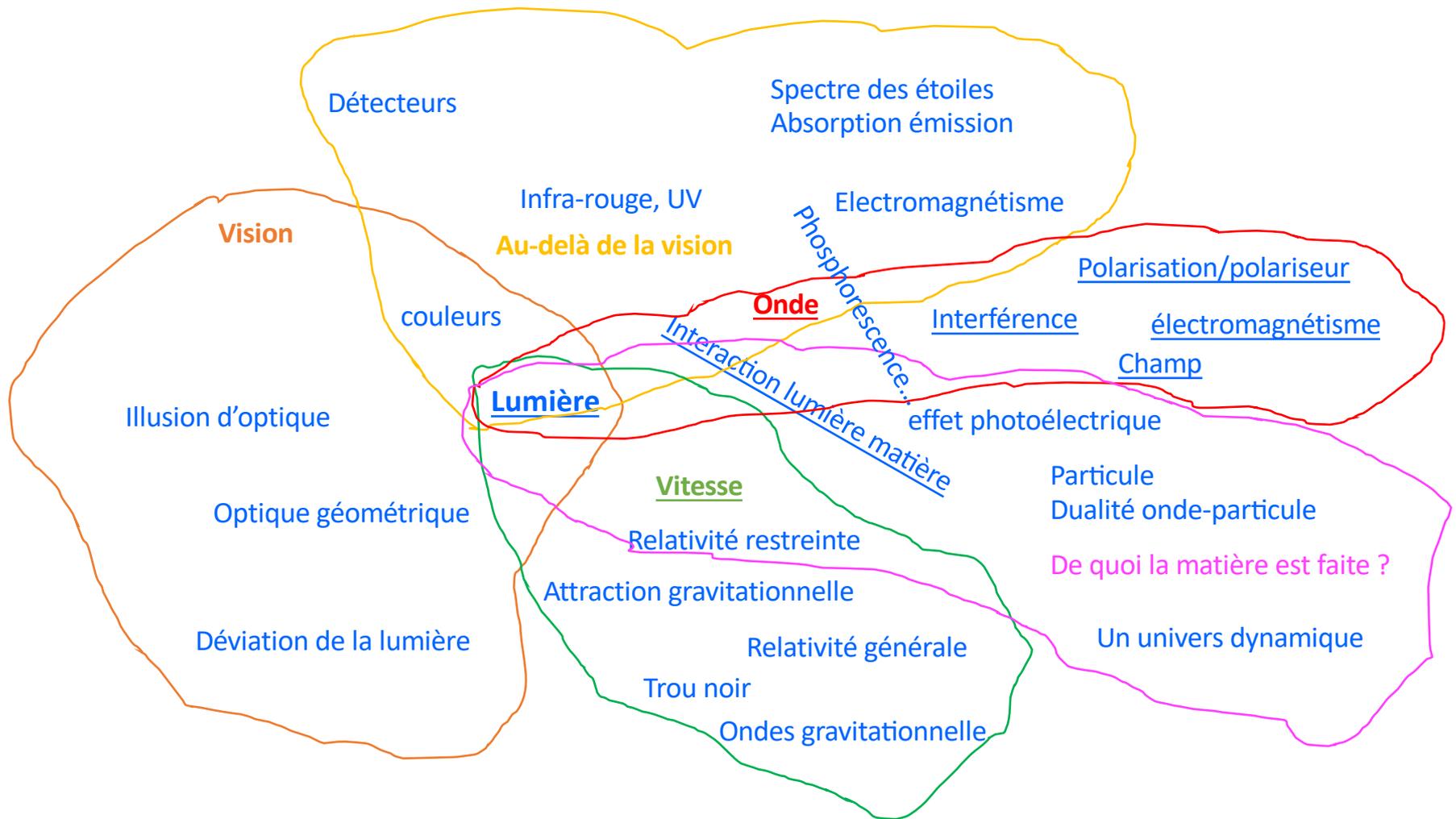
Cas relativiste



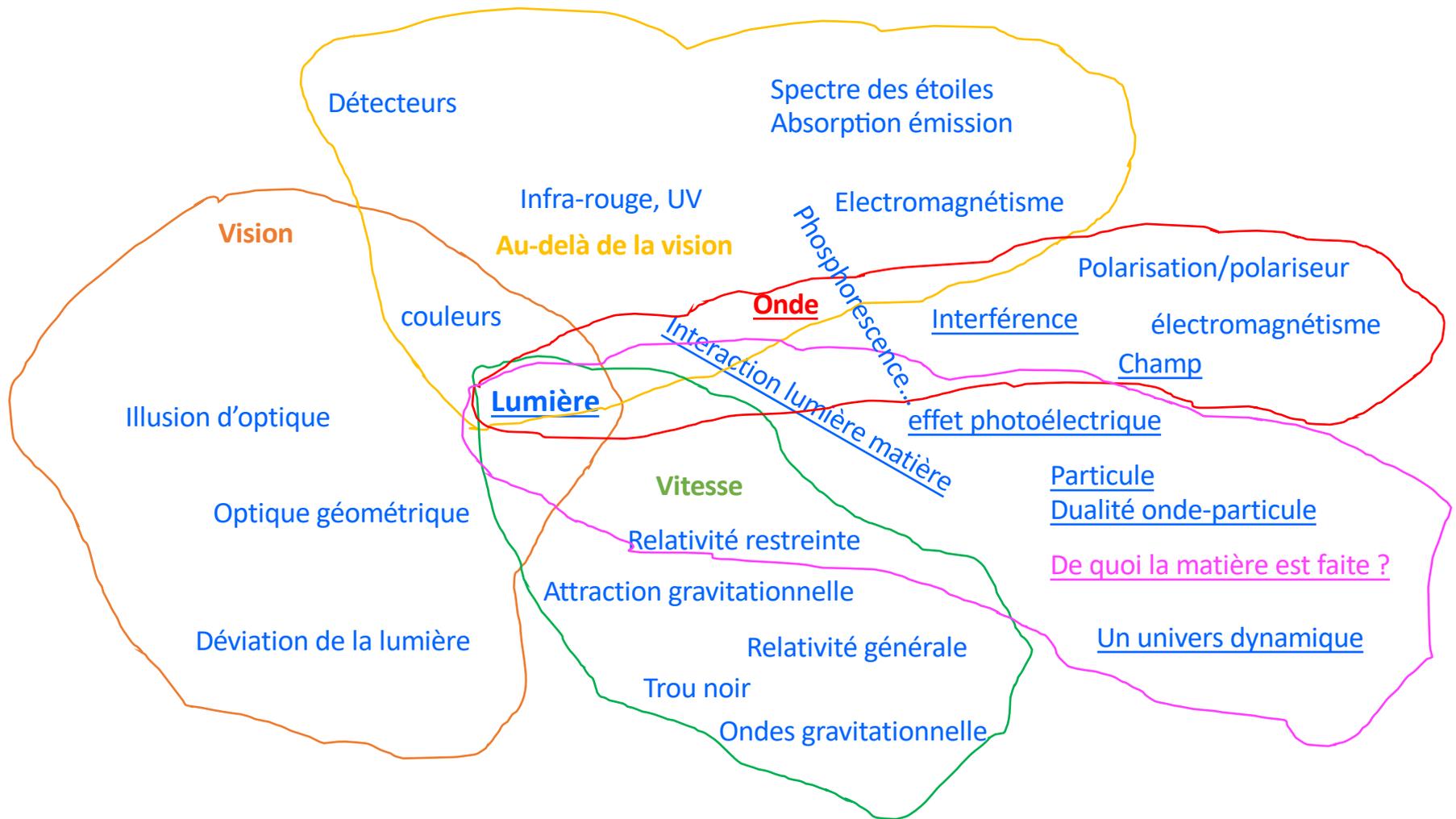
- Détermination de la vitesse des corps célestes



# Mon nuage de mots



# Mon nuage de mots



# But et plan de ce cours

---

- **Développer une nouvelle intuition de ce qu'est la matière**
  - Résumé du cours précédent
    - Développement de la notion de **champ**
    - Rappel de la méthode d'addition des ondes
  - Plongée dans la matière
  - Détour par la lumière
    - La lumière est une onde
      - Expérience de Thomas Young
      - Diffraction
      - Maxwell
    - La lumière est composée de particules
      - Effet photo-électrique
  - Retour vers la matière
    - Louis de Broglie
    - Diffraction des électrons
  - Champs et particules
  - Différent type de particules qui interagissent
    - $E = mc^2$
    - Rien ne se perd, rien ne se crée mais tout se transforme

# Une vision « classique » de la matière

---

<https://videos.cern.ch/record/2307614>



Mais que sont ces « particules élémentaires » ?

---

# Retour vers la lumière

Quand elle acquiert le « statut » d'onde...



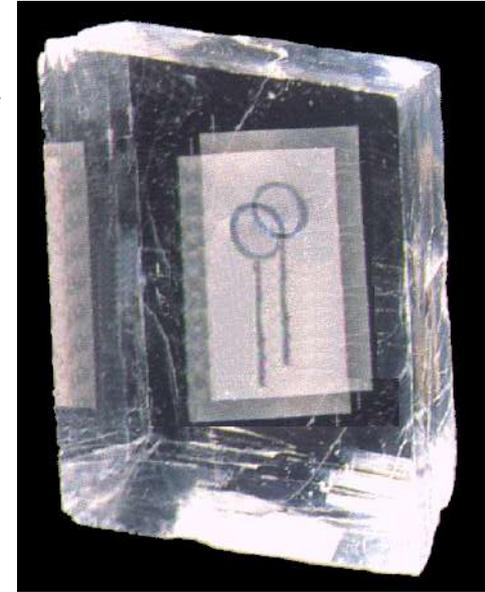
# Théorie corpusculaire de la lumière

---

- René Descartes (1596-1650)
  - Pense que la lumière voyage instantanément comme une impulsion au travers de toutes les particules. (analogie d'un bout de bois)
  - Décrit les lois de réflexion et réfraction (~500 ans après Ibn Sahl 983)
  
- Newton (1642-1727)
  - Soutient le modèle corpusculaire
    - La lumière devrait aller plus vite dans le verre que dans le vide
    - Ne peut expliquer pourquoi deux faisceaux de lumière qui se croisent ne se dévient pas l'un l'autre
  - Le prestige de Newton empêchera longtemps la théorie ondulatoire de prendre le dessus.

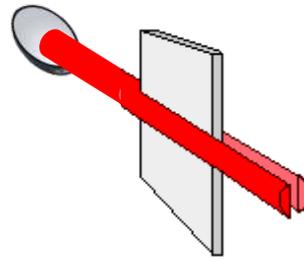
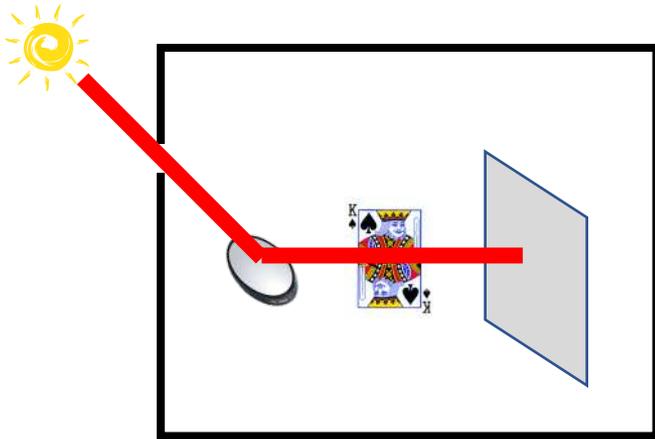
# Théorie ondulatoire de la lumière

- Christiaan Huygens (1629-1695)
  - Réussi à expliquer les lois de la réflexion et de la réfraction en supposant que la lumière se déplace comme une onde (1678).  
Il explique aussi la double réfraction du « spath d'Islande »
- Thomas Young (1773-1829)
  - 1801, Interférences, expériences de fentes de Young
- Augustin Fresnel (1788-1827)
  - Diffraction, Prix de l'académie de 1819.
- James Clerck Maxwell (1831-1879)
  - Électromagnétisme. Relie l'électricité, le magnétisme et la lumière.

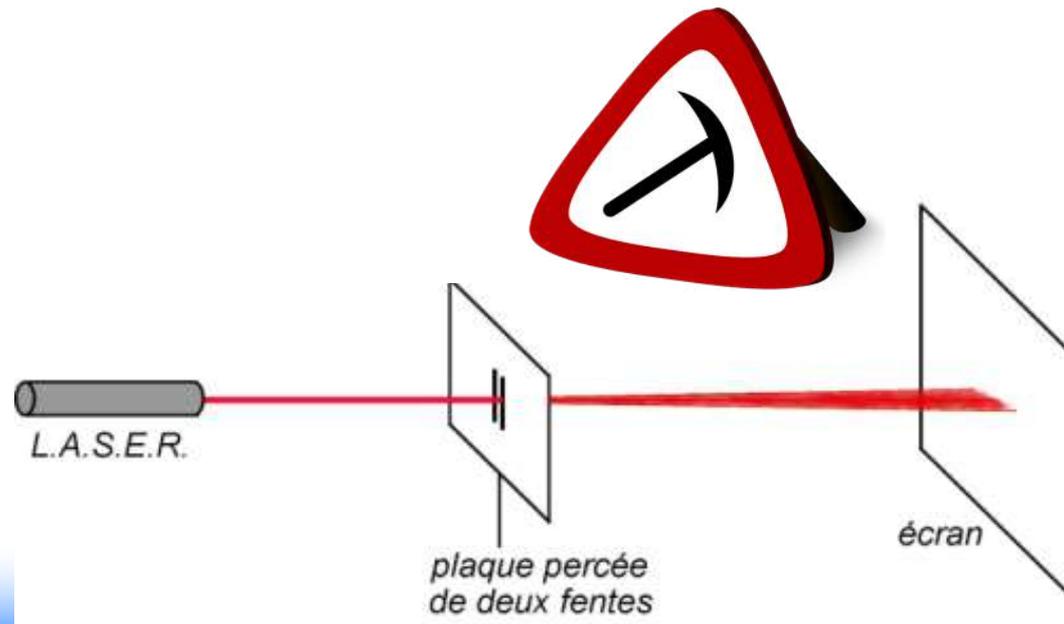


# La lumière est une onde

- Expérience de Thomas Young



- Réalisation moderne



# Expérience de Thomas Young

---

- Explication

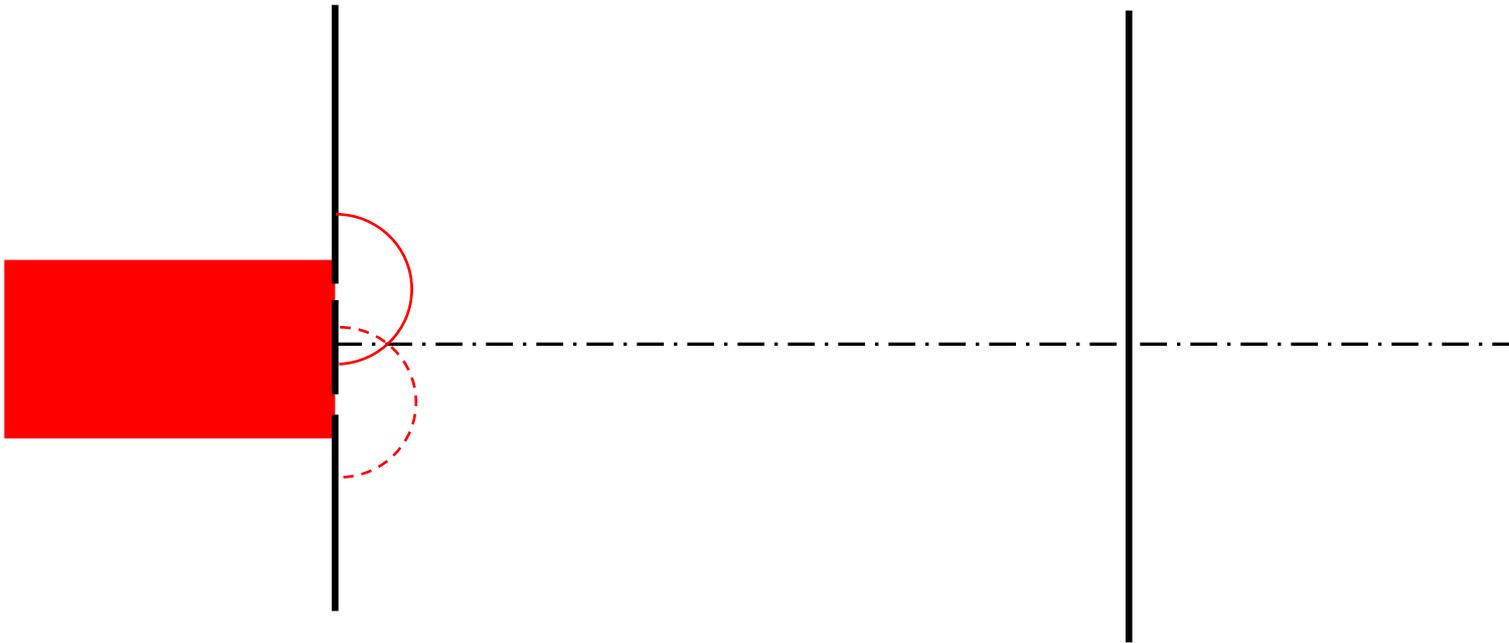


De chaque fente, une onde circulaire se propage...

# Expérience de Thomas Young

---

- Explication

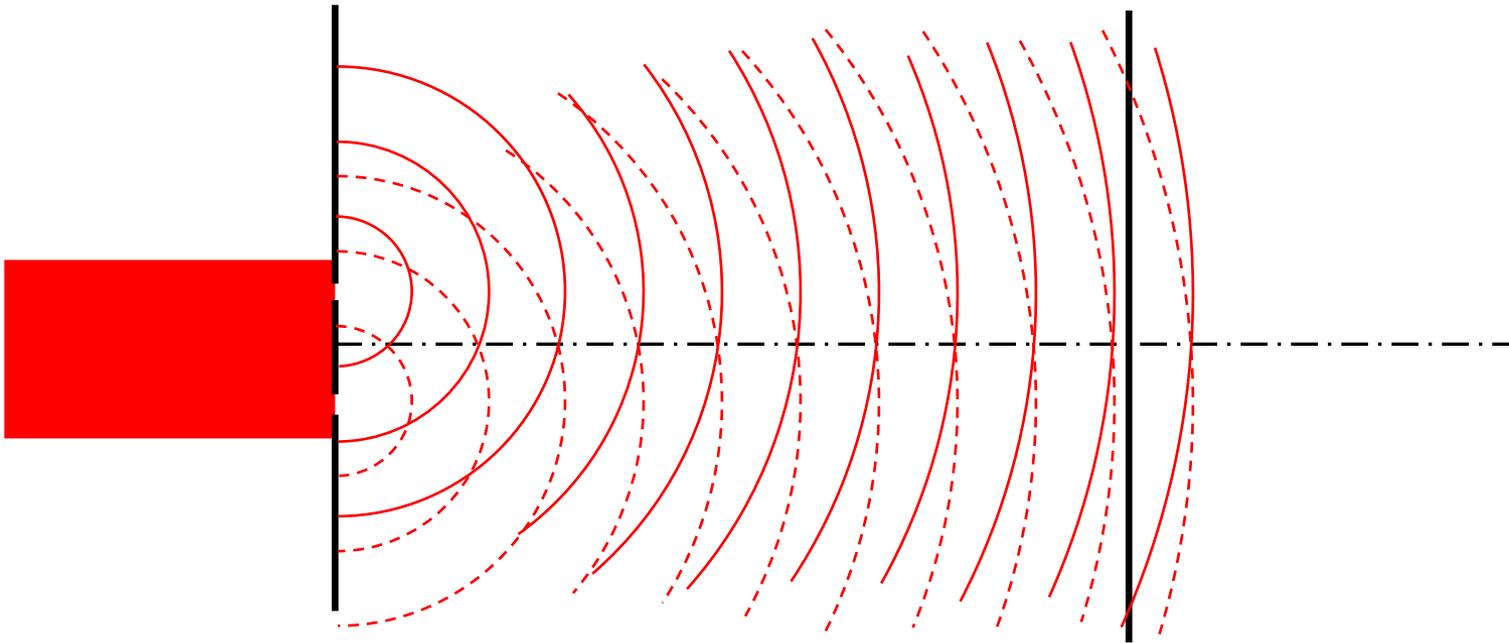


De chaque fente, une onde circulaire se propage...

# Expérience de Thomas Young

---

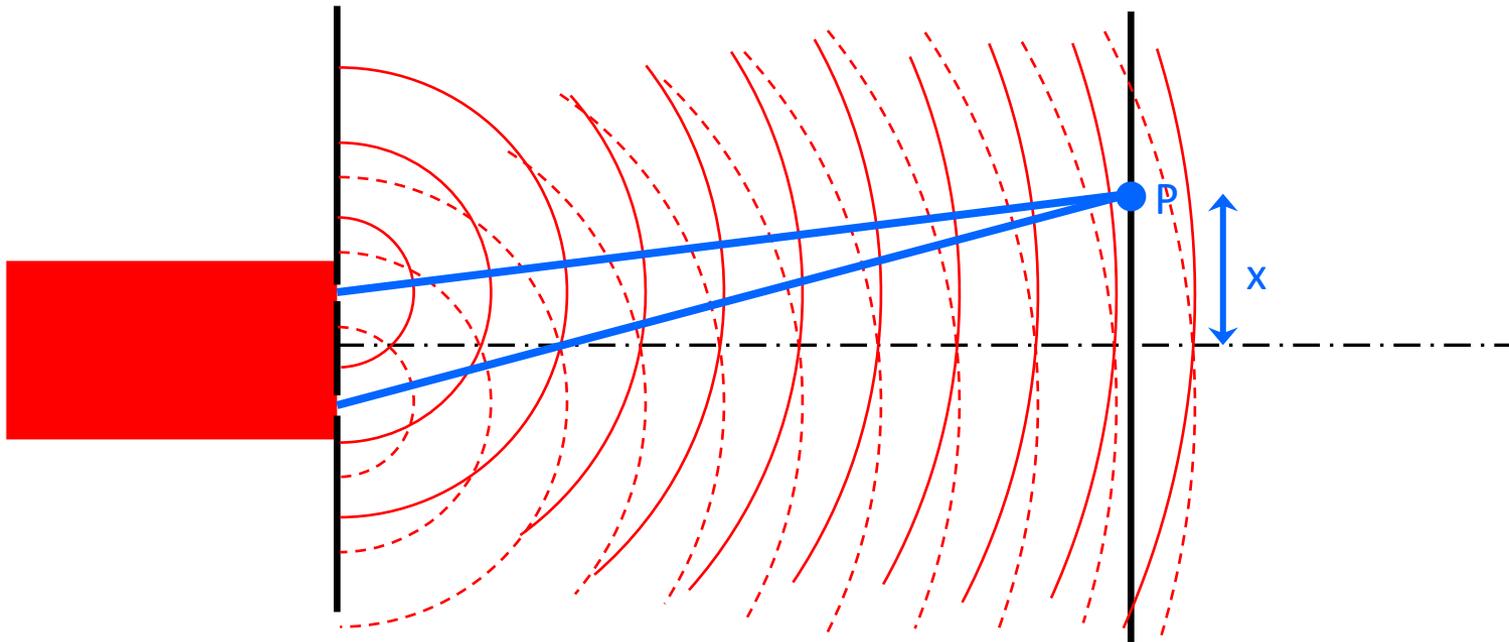
- Explication



De chaque fente, une onde circulaire se propage...

# Expérience de Thomas Young

- Explication



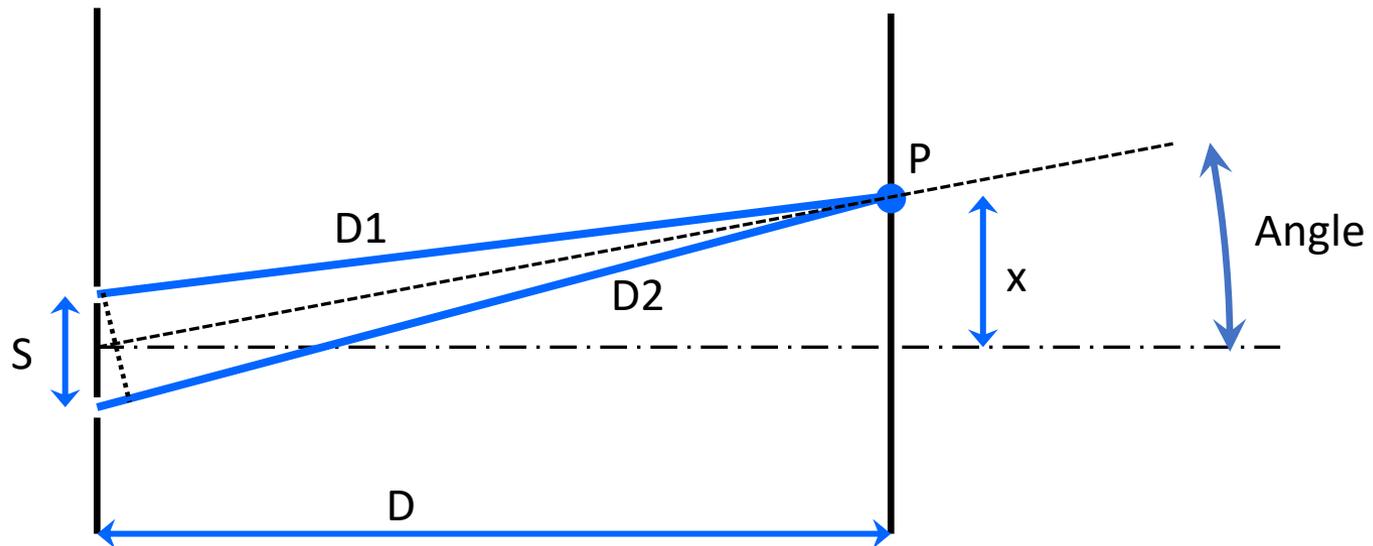
De chaque fente, une onde circulaire se propage...

En un point « P » de l'écran, ces ondes s'additionnent.

Quelle est la différence de phase entre ces deux ondes ?

# Expérience de Thomas Young

- Explication

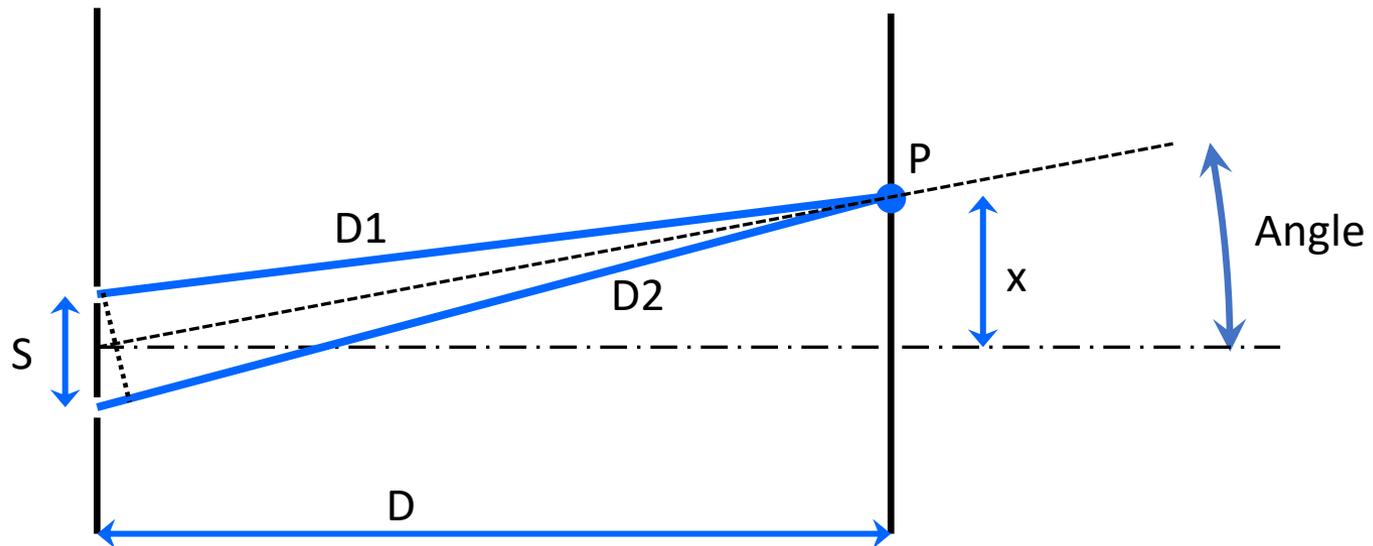


La différence de phase =  $360^\circ * ( D_2 - D_1 ) / \lambda$

Remarque: si  $D_2 - D_1 = \lambda/2$ .  $\rightarrow$  Différence de phase de  $180^\circ$   $\rightarrow$  P est sombre

# Expérience de Thomas Young

- Explication



La différence de phase

$$= 360^\circ * ( D_2 - D_1 ) / \lambda$$

$$\sim 360^\circ * ( S * \sin(\text{Angle}) ) / \lambda$$

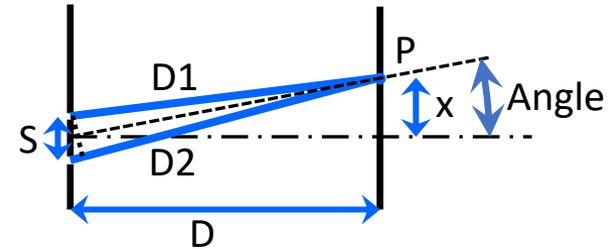
Pour  $D \gg x$  et  $D \gg S$

$$\sim 360^\circ * ( S * x / D ) / \lambda$$

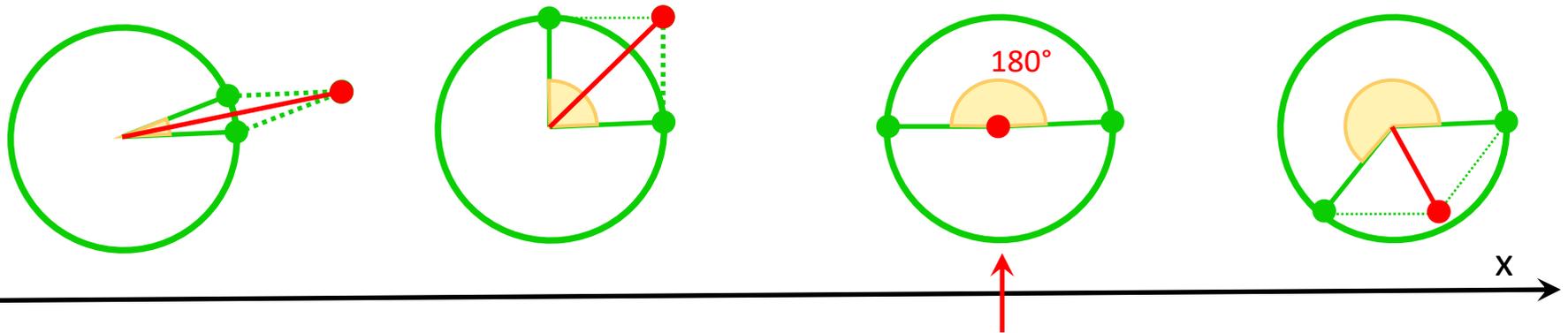
# Expérience de Thomas Young

## • Explication

- $S$  = Séparation entre les fentes
- $D_1$  = distance entre la fente supérieure et  $P$
- $D_2$  = distance entre la fente inférieure et  $P$
- $D$  = distance entre les fentes et l'écran
- $X$  = position du point  $P$  sur l'écran par rapport au centre des deux fentes



- **Différence de phase =  $360^\circ * (S * x / D) / \lambda$**



$$x = D * \lambda / (2S)$$

$$= 4 * 532 \cdot 10^{-9} / (2 * 0,6 \cdot 10^{-3})$$
$$\sim 1,77 \text{ mm}$$

$$\text{Pour } D = 4 \text{ m, } \lambda = 532 \text{ nm, } S = 0,6 \text{ mm}$$

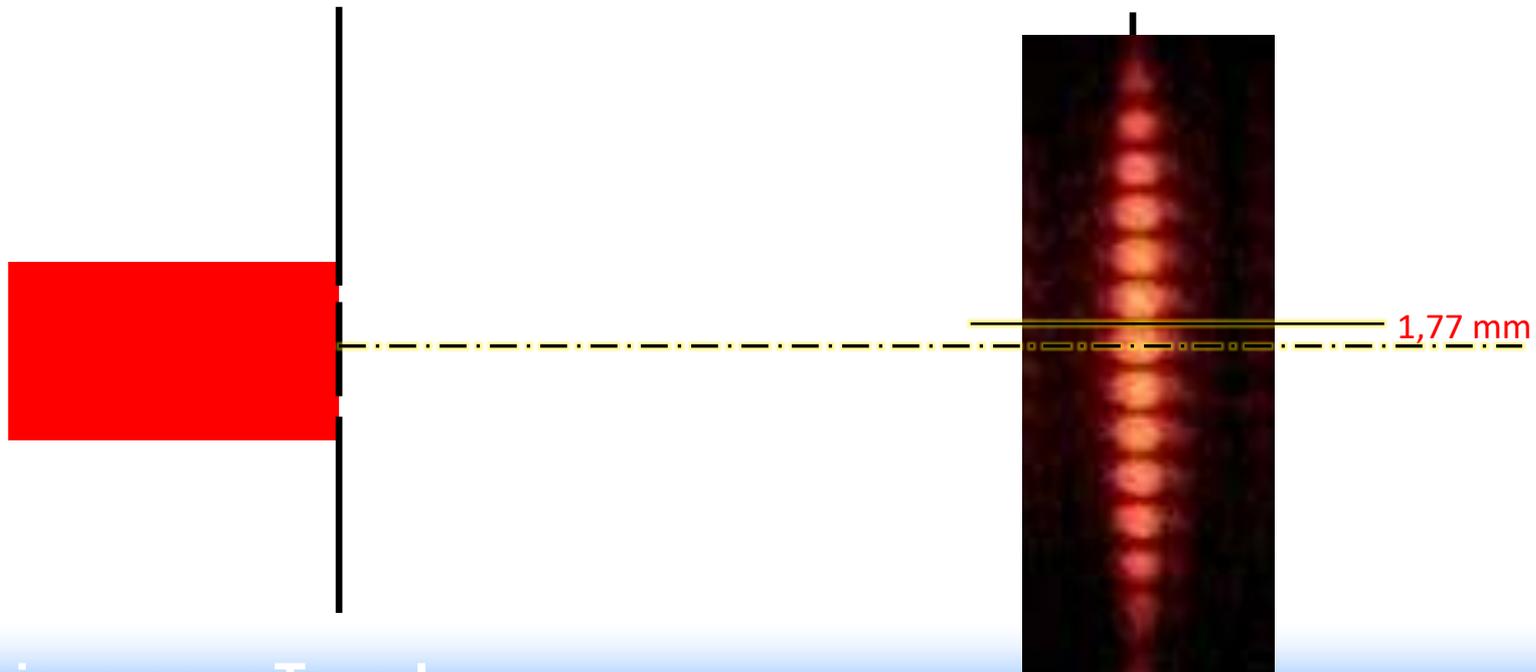
# Expérience de Thomas Young

- Explication

- Pour  $x = D \cdot \lambda / (2S)$

~1,77 mm,

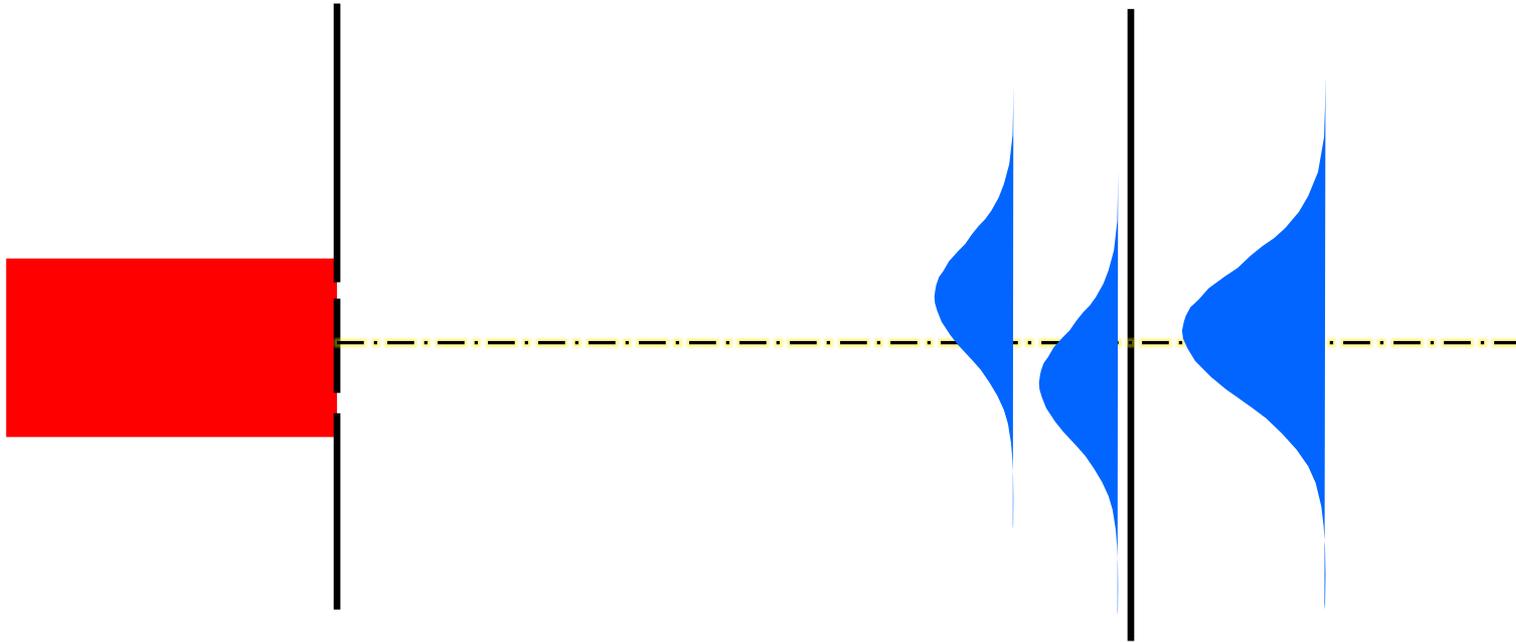
les deux ondes arrivent en opposition de phase  
et elles s'annulent l'une l'autre



# Expérience de Thomas Young

---

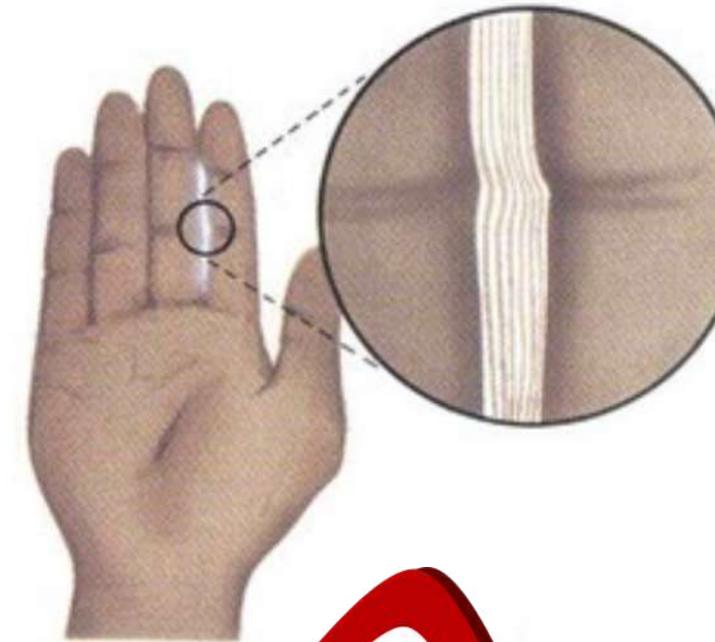
- Si la lumière était composée de billes
  - Absence d'interférence



➔ La lumière se comporte comme une onde et pas comme des billes...

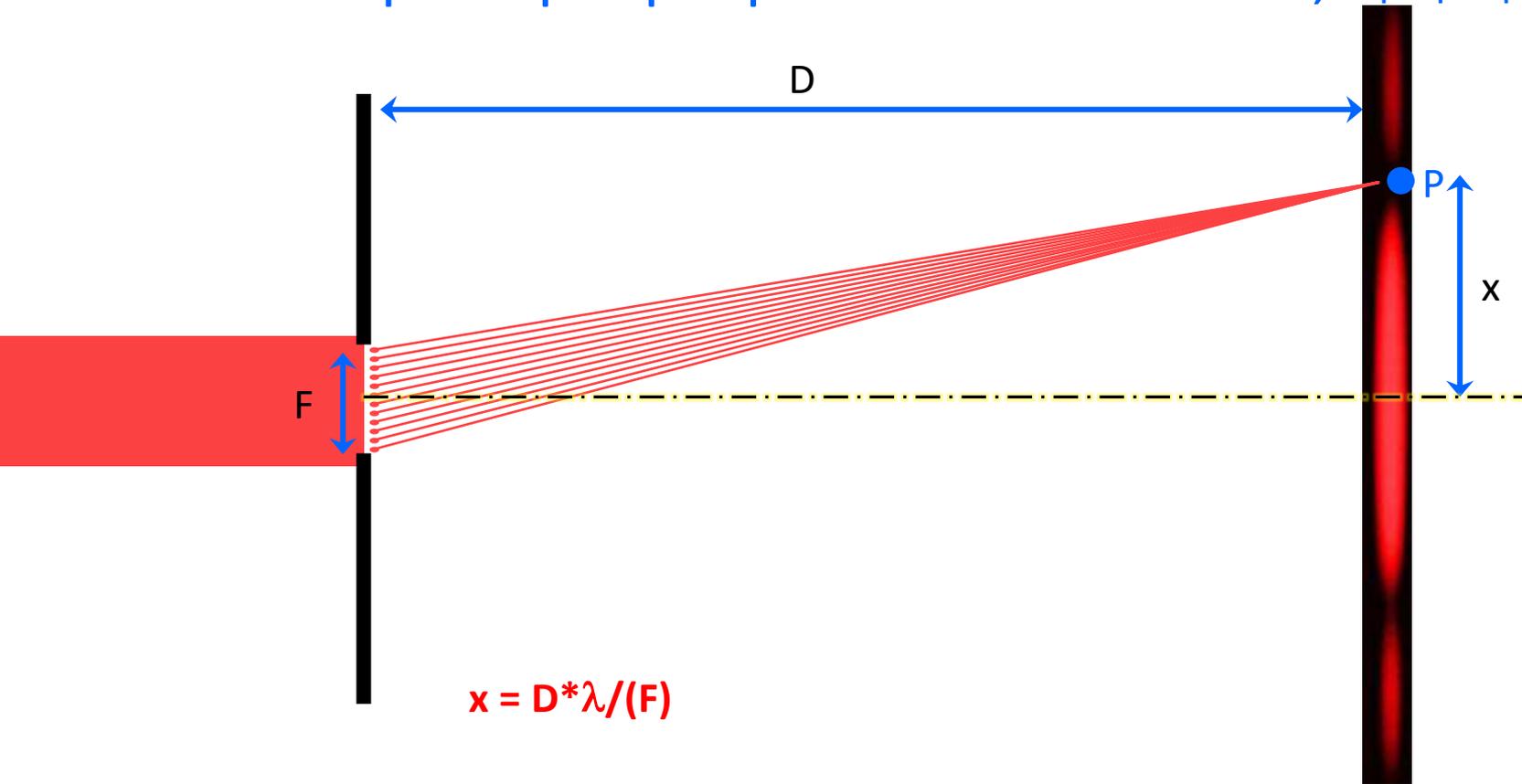
# Diffraction

- Observation



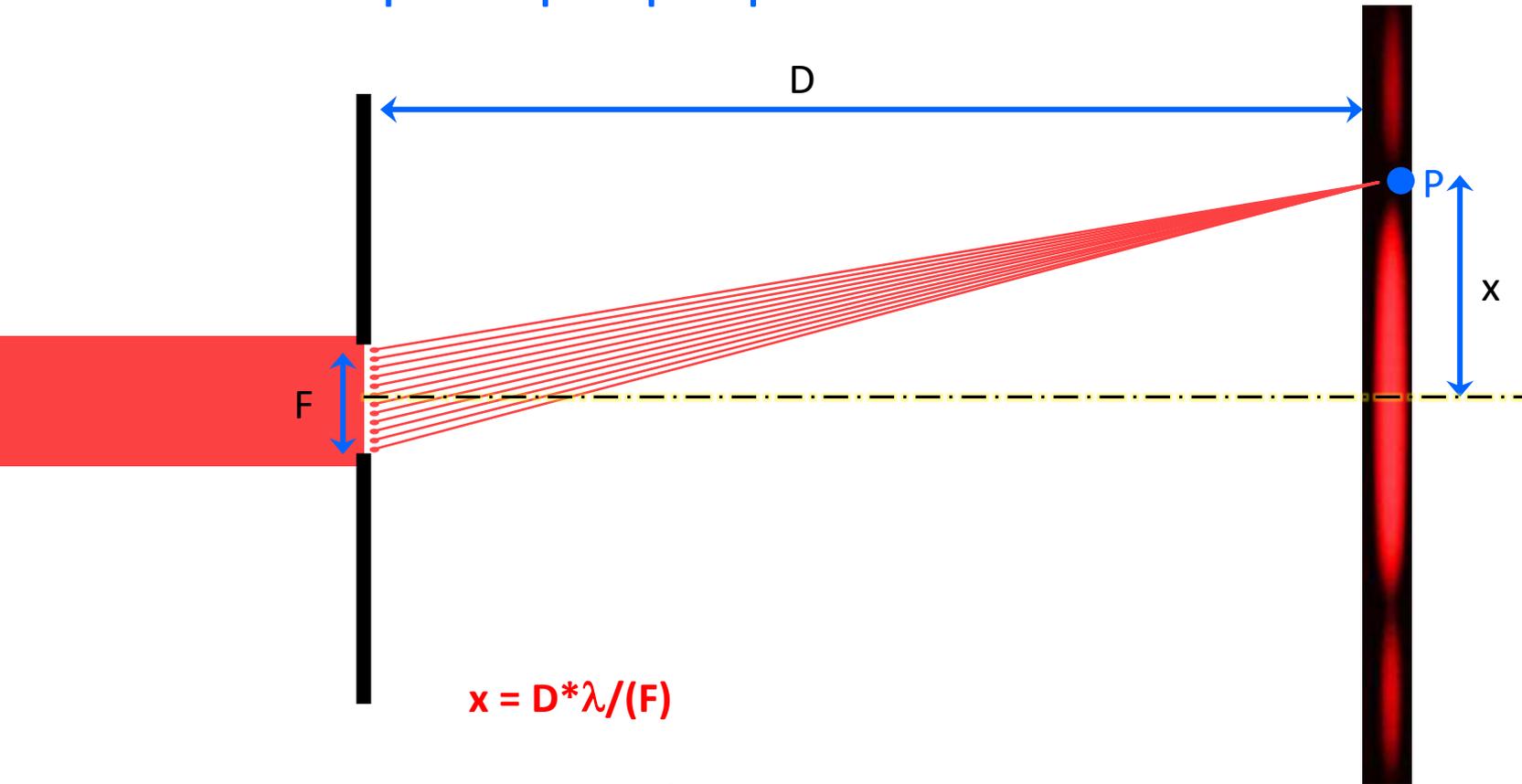
# Diffraction

- Même principe que pour la double fente, expliqué par Fresnel



# Diffraction

- Même principe que pour la double fente



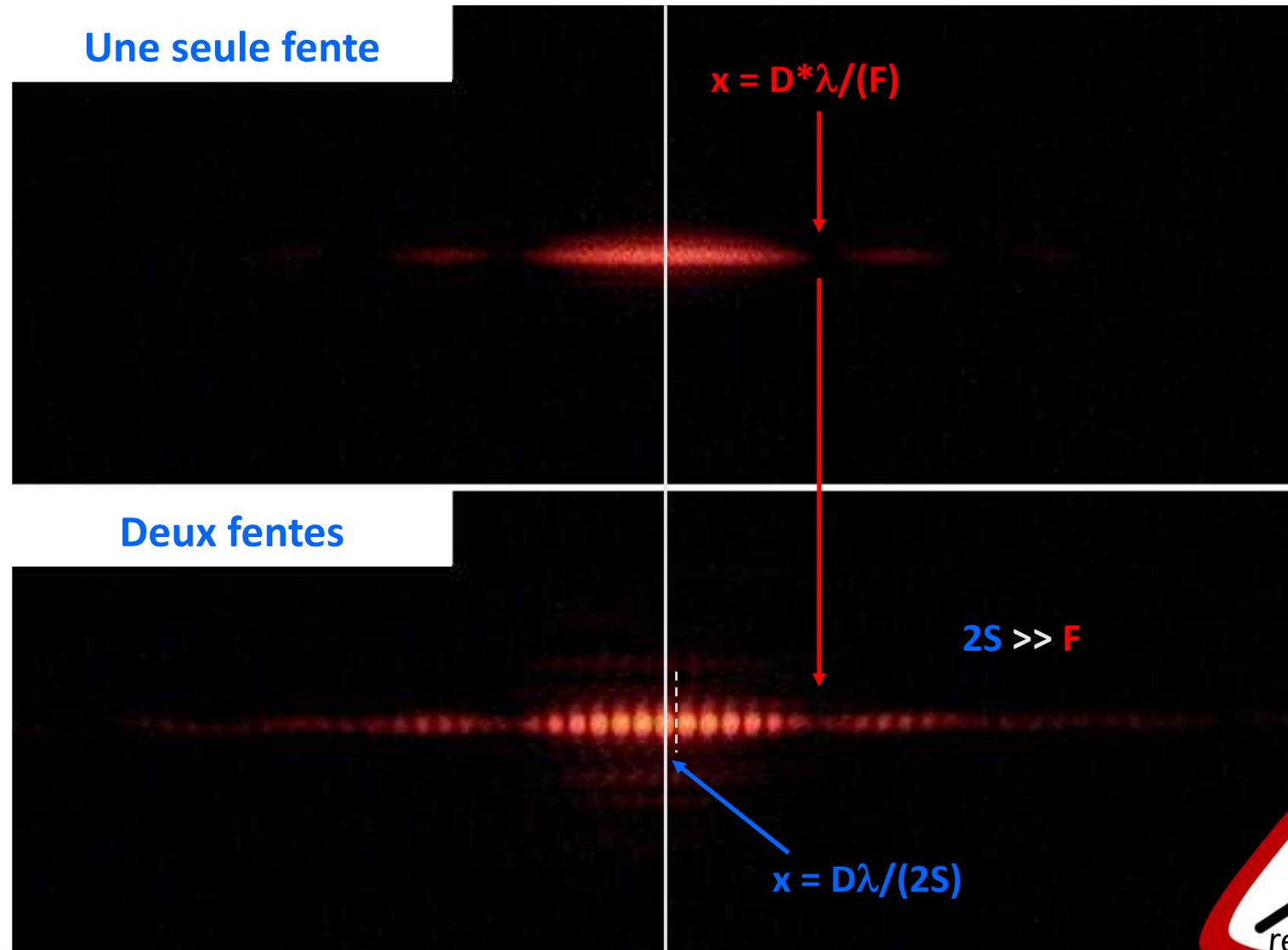
$$x = D \cdot \lambda / (F)$$

Pour deux fentes, on avait le premier point sombre

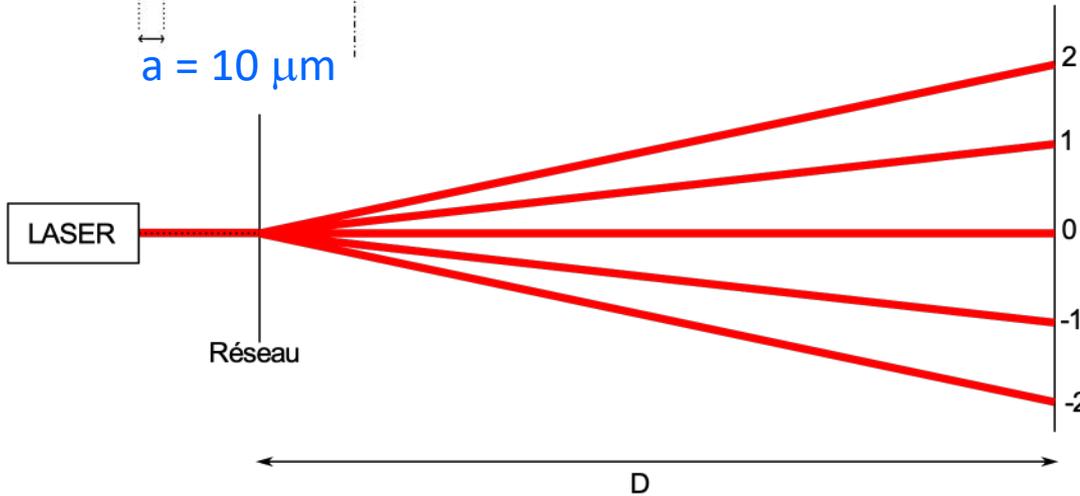
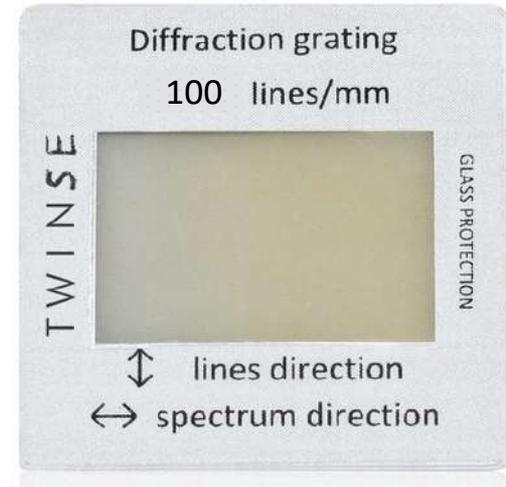
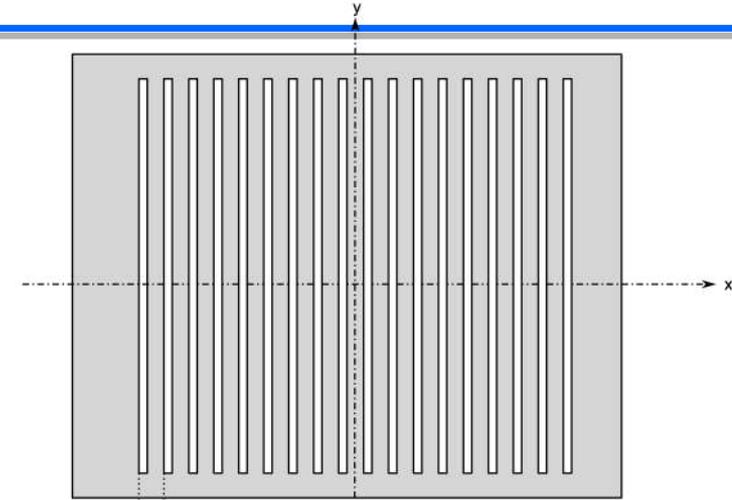
à  $x = D \lambda / (2S)$

où  $S$  est la séparation des fentes

# Double fente avec diffraction



# Réseau



$$x = n * (\lambda/a) * D$$

$$= n * (0,053) * D$$

$$\text{si } \lambda = 532 \text{ nm}$$

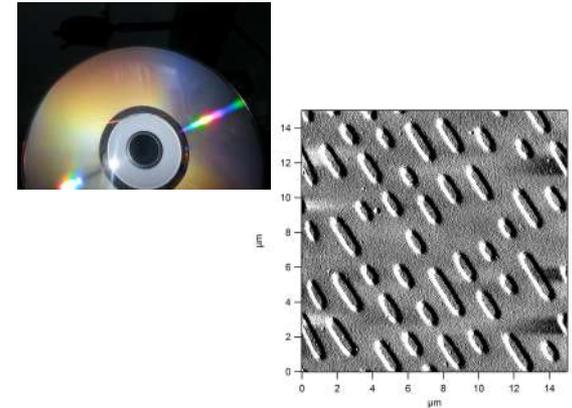
$$= n * 21,2 \text{ cm}$$

$$\text{si } D = 4 \text{ m}$$

# Sur le même principe

- Disque laser

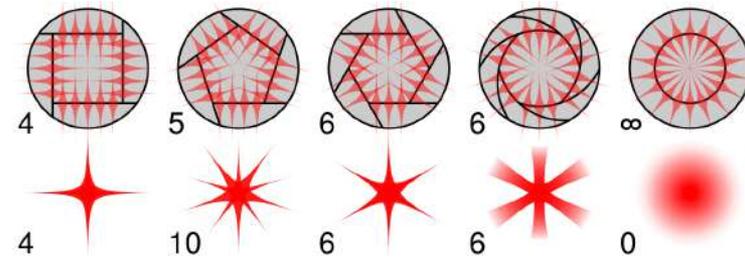
- CD: alvéoles de 0,8 microns avec espacement de 1,6
- DVD: alvéoles de 0,4 microns avec espacement de 0,8



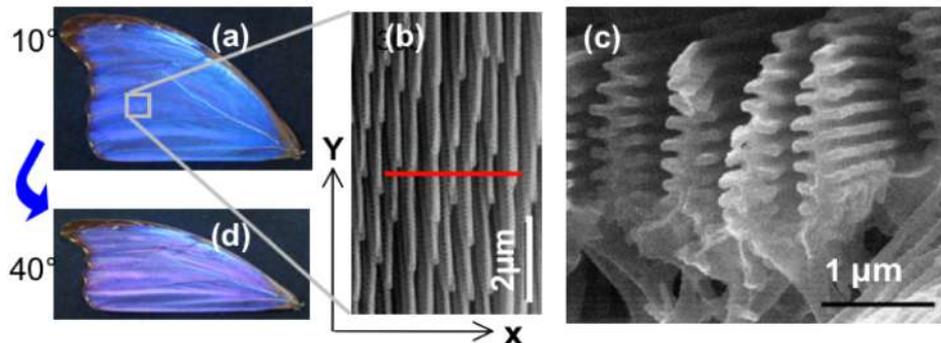
- Rideau



- Forme apparentes des étoiles et objectif



- Couleurs structurelles



Sur le même principe

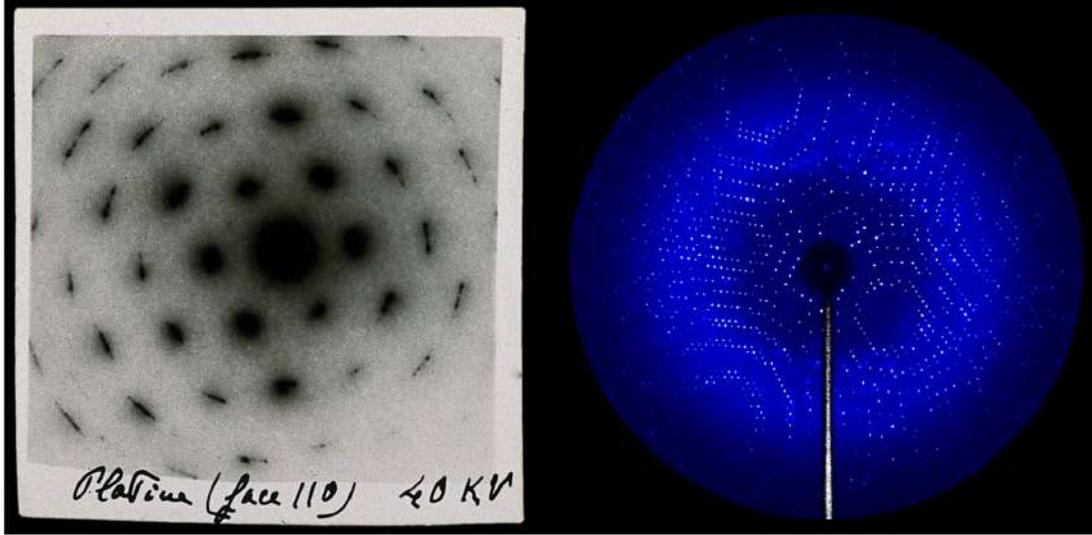
---

# Cristallographie et réseau réciproque

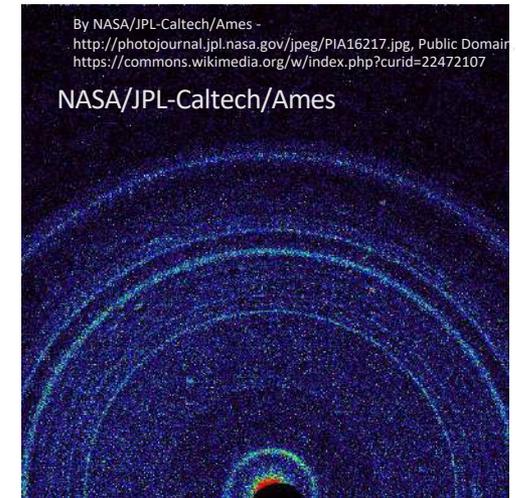
[https://toutestquantique.fr/telechargement/index.php?document=8\\_cristallographie\\_fr.mp4](https://toutestquantique.fr/telechargement/index.php?document=8_cristallographie_fr.mp4)

# Sur le même principe

- Cristallographie



Une des premières images par diffraction de rayons X à gauche et une image récente à droite.



Première images par diffraction de rayons X du sol martien (CheMin sur Curiosity)

# La lumière est une onde

---

- James Clerck Maxwell (1831-1879)
  - Equations (1864 puis 73). Réécrites par Heaviside (1884)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

E = champ électrique

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

B = champ magnétique

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$\rho$  = densité de charge

J = densité de courant électrique

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}$$

c = vitesse de la lumière

# La lumière est une onde

- James Clerck Maxwell (1831-1879)
  - Equations (1864 puis 73). Réécrites par Heaviside (1884)

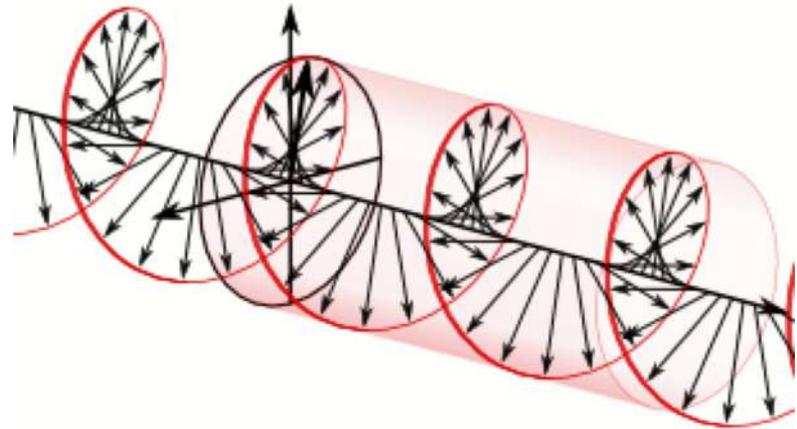
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}$$

Variation du champ par rapport au temps



# La lumière est une onde

- James Clerck Maxwell (1831-1879)
  - Equations (1864 puis 73). Réécrites par Heaviside (1884)

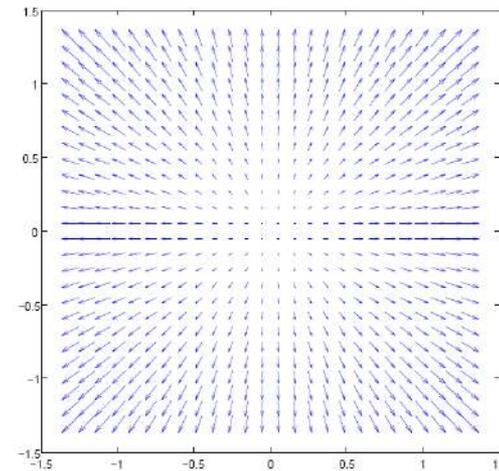
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}$$

Divergence d'un champ



# La lumière est une onde

- James Clerck Maxwell (1831-1879)
  - Equations (1864 puis 73). Réécrites par Heaviside (1884)

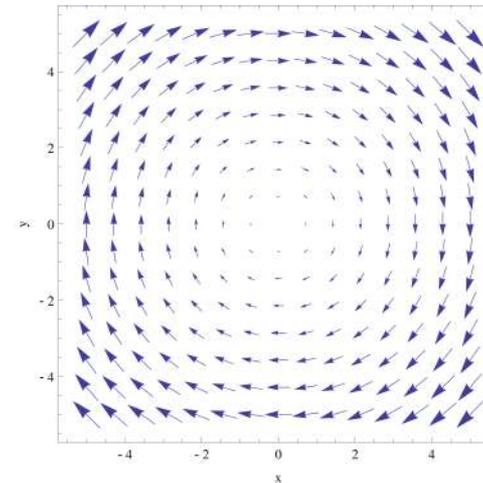
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}$$

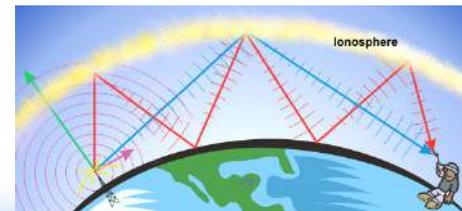
Rotationnel d'un champ



# La lumière est une onde

---

- James Clerck Maxwell...
  - Les champs électromagnétiques peuvent osciller et former une onde qui se déplace dans le vide à la vitesse de la lumière (vérifié par Herz en 1886)
  - **La lumière est une onde électromagnétique**
- 1901 : Marconi établit une liaison transatlantique par radio.
- 1902 : Heaviside en Angleterre et Kennelly en Amérique imaginent l'existence à très haute altitude de couches réfléchissantes pour les ondes radio : les couches de Kennelly-Heaviside.



---

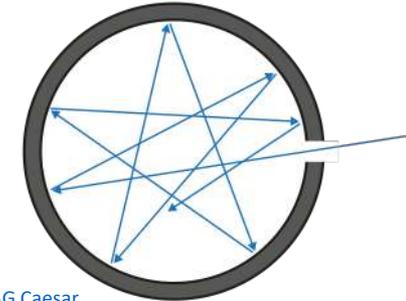
# La lumière est une onde...

Vraiment ?



# Le corps noir (rappel du 2<sup>ème</sup> cours)

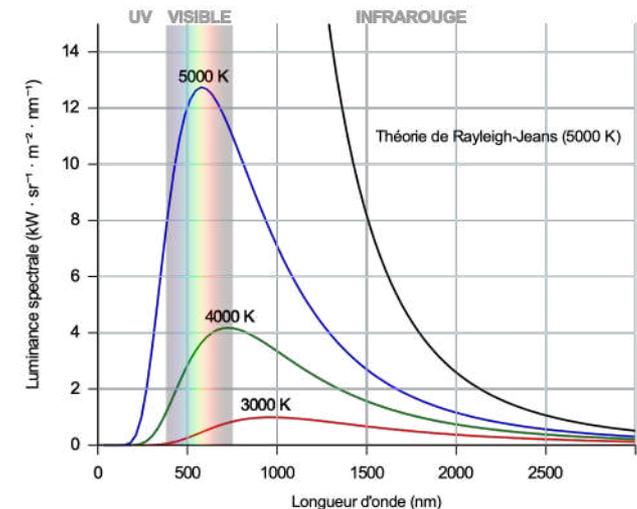
- Un corps qui émet et absorbe parfaitement les ondes électromagnétiques
- Rayleigh et Jeans supposent qu'il est constitué d'atomes qui peuvent osciller pour émettre ou absorber des ondes. Il en déduisent une loi d'émission du corps noir... Qui prédit des valeurs infinies... Problématiques et en désaccord avec les observations



AG Caesar

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black\\_body\\_realization.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body_realization.svg)

- Planck (décembre 1900)  
**Hypothèse révolutionnaire:**  
 $E_0 = hc/\lambda (=h\nu)$   
**→ Résout le problème du corps noir**



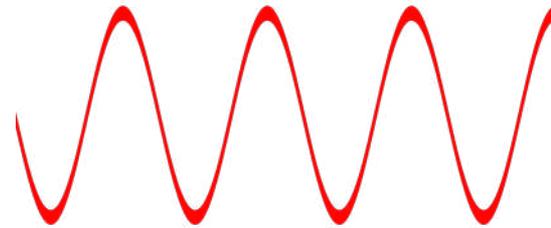
# Le corps noir (rappel du 2<sup>ème</sup> cours)

- L'hypothèse de Planck :  $E_0 = hc/\lambda (=h\nu)$ 
  - L'énergie d'une onde dépend de son amplitude.

Petite énergie  
Petite amplitude



Grande énergie  
Grande amplitude



- L'hypothèse de Planck revient à dire que l'énergie ne peut prendre n'importe quelle valeur mais seulement des multiples de  $E_0$
- Il ne pose cette hypothèse que pour les échanges d'énergie entre les oscillateurs du corps noir et les ondes...

# L'effet photoélectrique

---

- 1<sup>ère</sup> observation en 1839 par Becquerel.
- Présenté en 1887 par Hertz:
  - Une lame de zinc est déposée sur le plateau métallique d'un électroscope chargé négativement (excès d'électrons). On éclaire la lame de zinc avec un faisceau de lumière provenant d'un arc électrique (lumière visible et ultra-violette). On constate alors la décharge de l'électroscope. On peut donc supposer que la lumière expulse des électrons du métal. Mais si on filtre la lumière par une lame de verre qui absorbe les ultra-violets, l'électroscope reste chargé

# L'effet photoélectrique

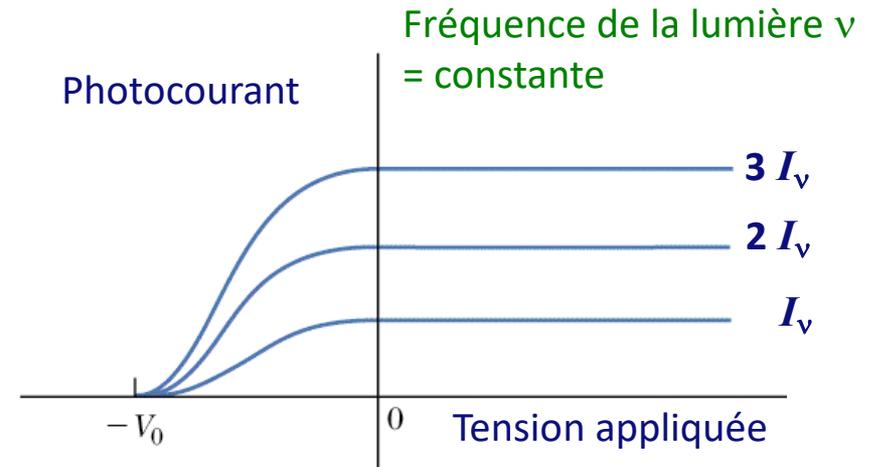
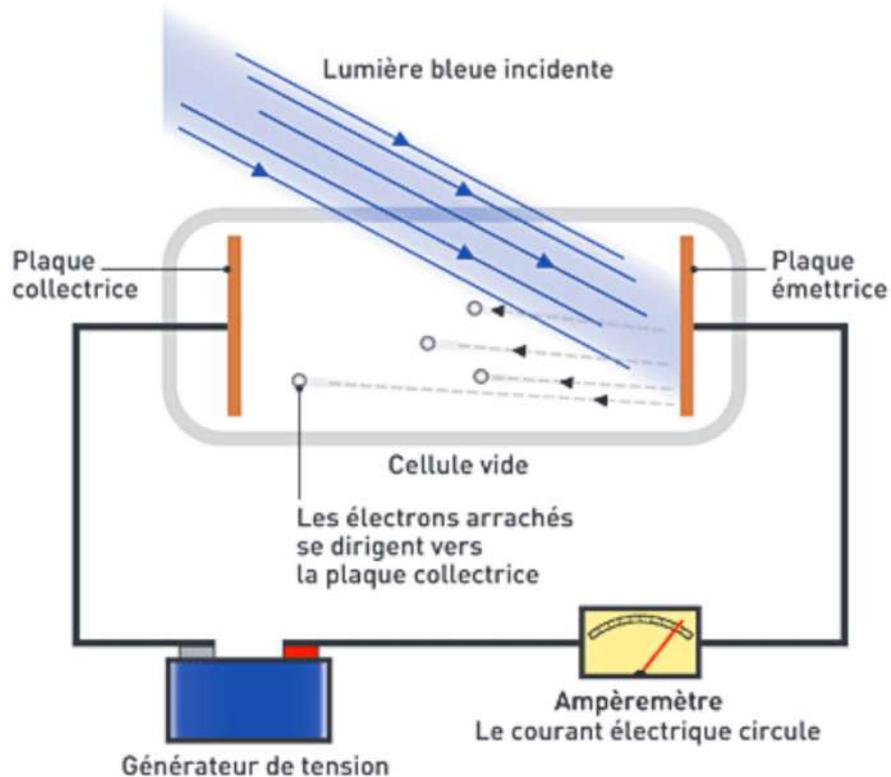


- L'électroscope (prêté par Thierry Pradier)



# L'effet photoélectrique

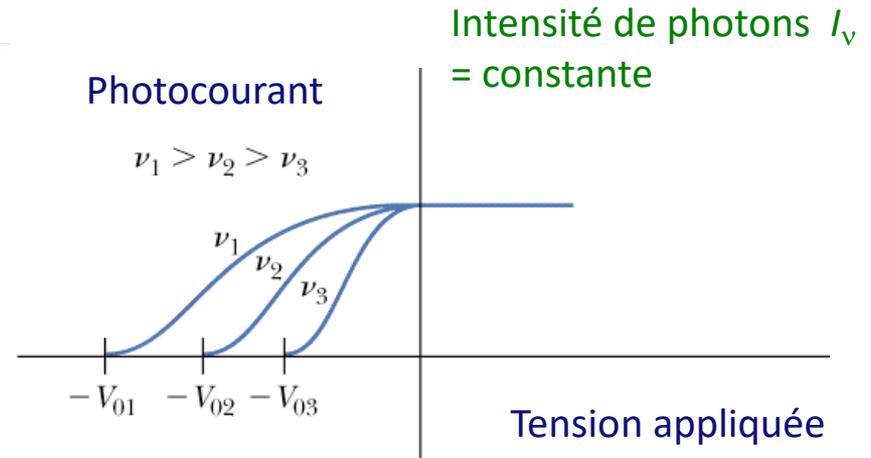
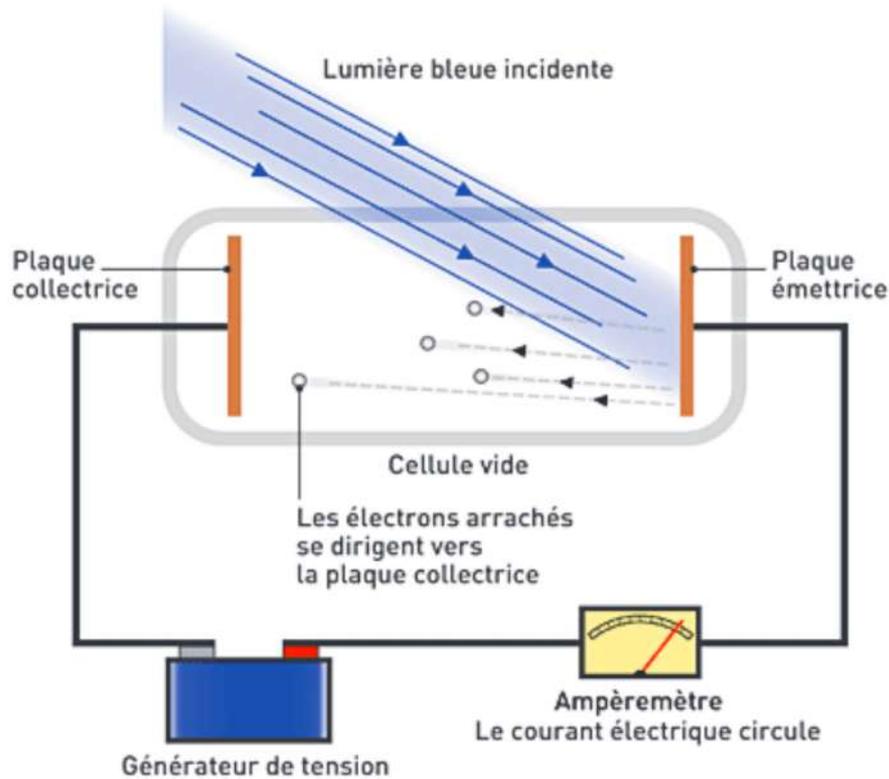
- Étudié par Lenard en 1899 et 1902



- La tension  $V_0$  indique l'énergie maximale des électrons émis
- Cette énergie ne dépend pas de l'intensité lumineuse

# L'effet photoélectrique

- 1<sup>ère</sup> observation en 1839, présenté en 1887 par Hertz, étudié par Lenard en 1899 et 1902



- Cette énergie dépend de la fréquence de la lumière.

- Einstein (1905) :

$$V = h\nu - W$$

➔ Photon !

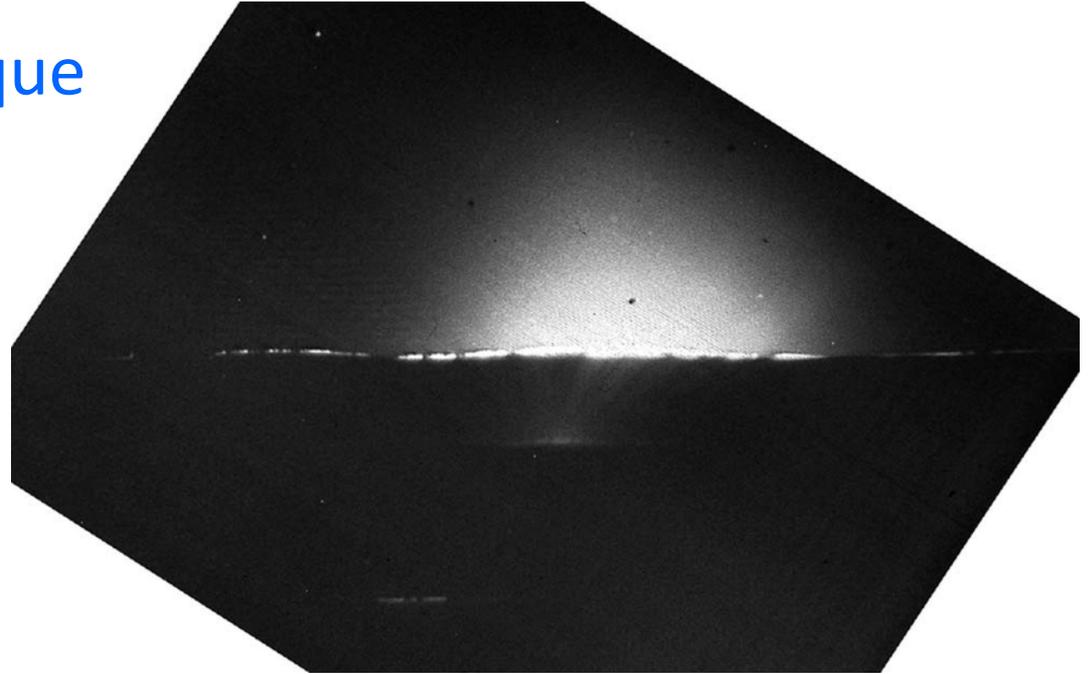
# La lumière est composée de particules

- L'effet photoélectrique
  - Poussière de Lune



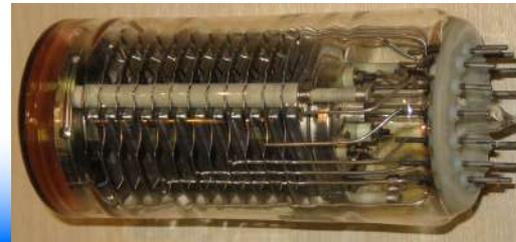
Collecting Lunar Samples on Apollo 17  
Spacewalk - December 1972

[https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/257757main\\_as17-134-20425\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/257757main_as17-134-20425_full.jpg)



<https://phys.org/news/2009-04-years-moon-hazard-sun-elevation.html...>  
<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6523>

- PhotoMultiplicateur & photodiode, photovoltaïque



?

# Alors... Onde ou particule ?

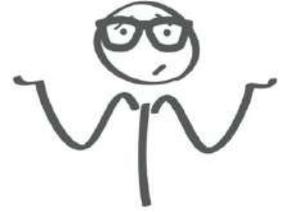
---





# La lumière...

---



- Est-ce une onde ?
- Est-ce une particule ?

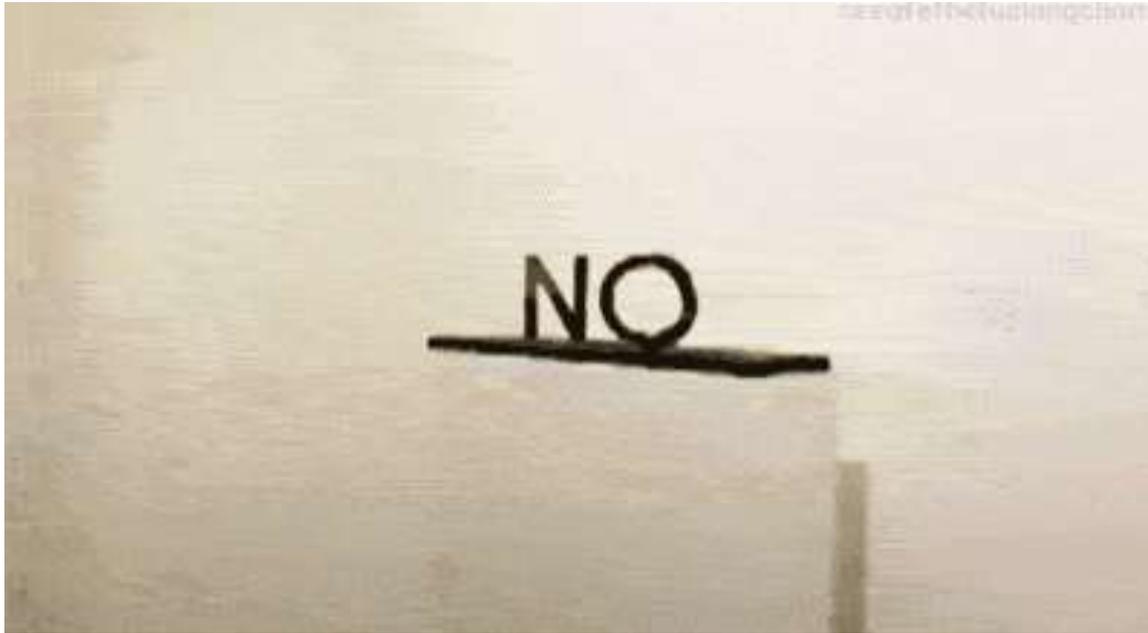


# La lumière...

---

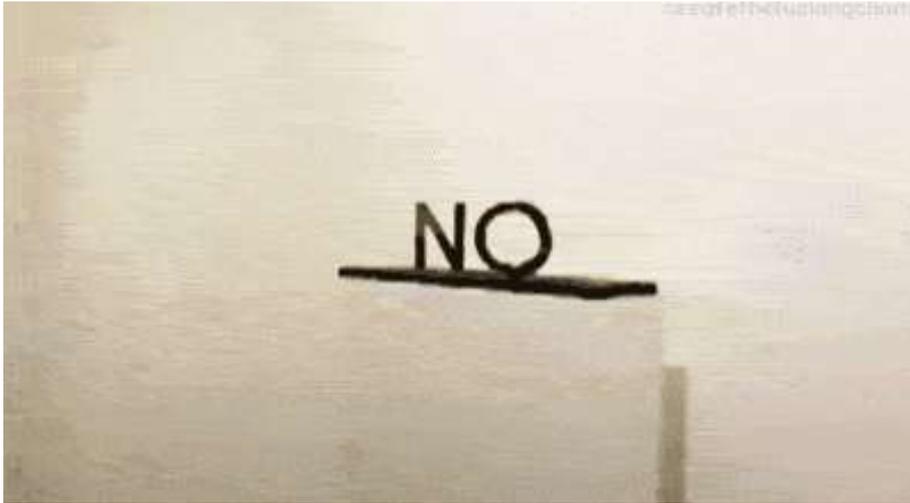


- Est-ce une onde ?
- Est-ce une particule ?

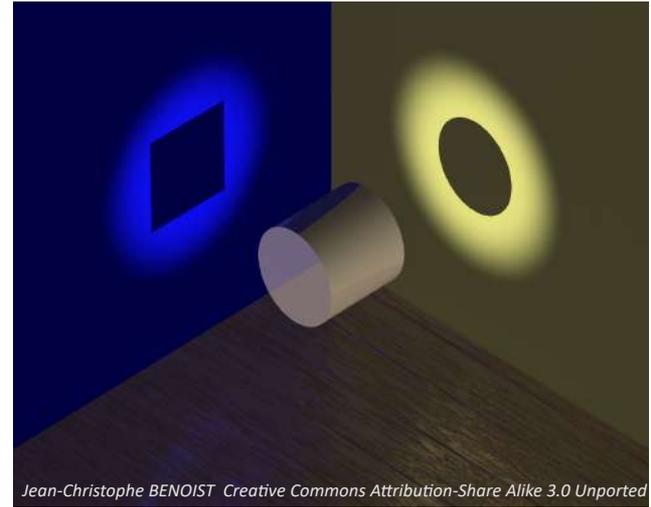


Yes No par Raetz Markus

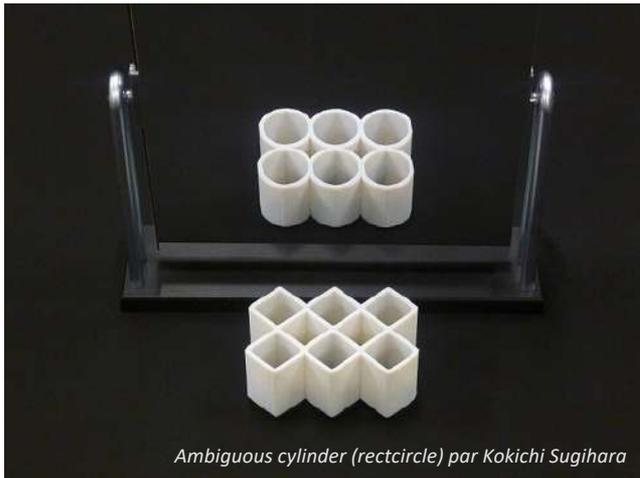
# Ni onde ni particule !



Yes No par Raetz Markus



Jean-Christophe BENOIST Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported



Ambiguous cylinder (rectcircle) par Kokichi Sugihara



Ambiguous cylinder (fullmoon stars) par Kokichi Sugihara

# Ni onde ni particule !

---

## **DUALITÉ ONDE-PARTICULE**

Toutes les animations et explications sur  
[www.toutestquantique.fr](http://www.toutestquantique.fr)

---

Et la matière ?



# Retour sur du concret



- **La Place Broglie** a prit cette appellation en l'honneur de François-Marie de Broglie (1671-1745). En janvier 1739 le Roi lui donna le commandement de l'Alsace avant de recevoir la gouvernance de Strasbourg en 1743. Durant ces quelques mois passés à Strasbourg, il a transformé l'ancienne place du Marché-aux-Chevaux en promenade publique avec de beaux jardins. Cette promenade deviendra l'actuelle place Broglie.

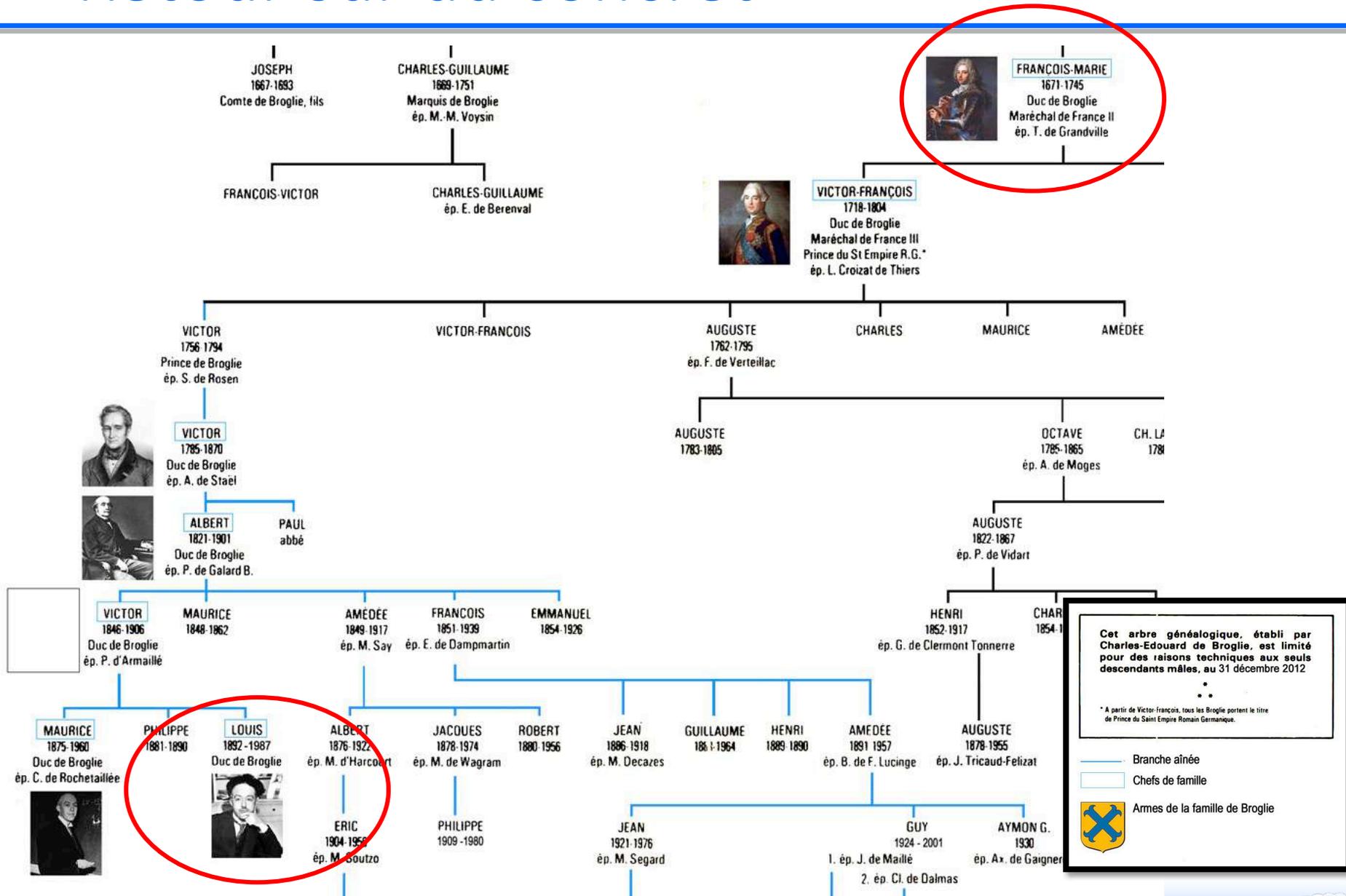


Engagement des hommes 1, 2, 3 & 5, 6 et 7  
Héros d'armes  
Le chevalier Boreau de Mülheim  
Le chevalier Nicolas de Westhausen  
Impasse de la Banque  
Groupe de chevaliers aléatoires

TOURNOI AU MARCHÉ-AUX-CHEVAUX (PLACE BROGLIE) en 1890

Source: www.umstrat.fr / Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg

# Retour sur du concret



# Louis de Broglie (1892-1987)

---

- 1924: la matière est ondulatoire

« Le fait que, depuis l'introduction par Einstein des photons dans l'onde lumineuse, l'on savait que la lumière contient des particules qui sont des concentrations d'énergie incorporée dans l'onde, suggère que toute particule, comme l'électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée [...] Mon idée essentielle était d'étendre à toutes les particules la coexistence des ondes et des corpuscules découverte par Einstein en 1905 dans le cas de la lumière et des photons. » « À toute particule matérielle de masse  $m$  et de vitesse  $v$  doit être « associée » une onde réelle » reliée à la quantité de mouvement par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

# Matière ondulatoire

- Vérification expérimentale
  - Davisson & Germer (1927)

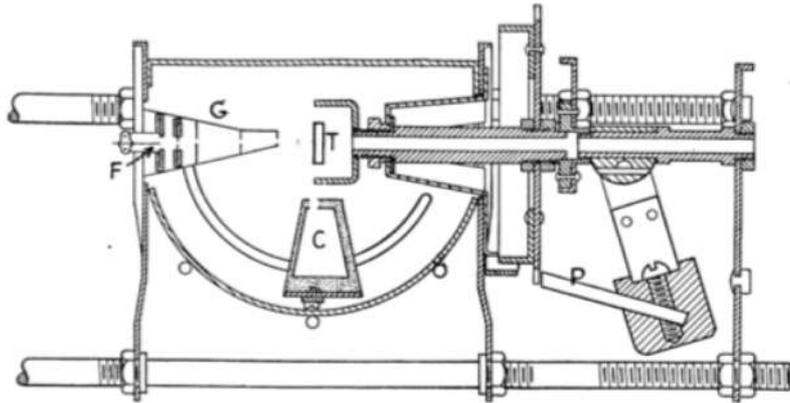
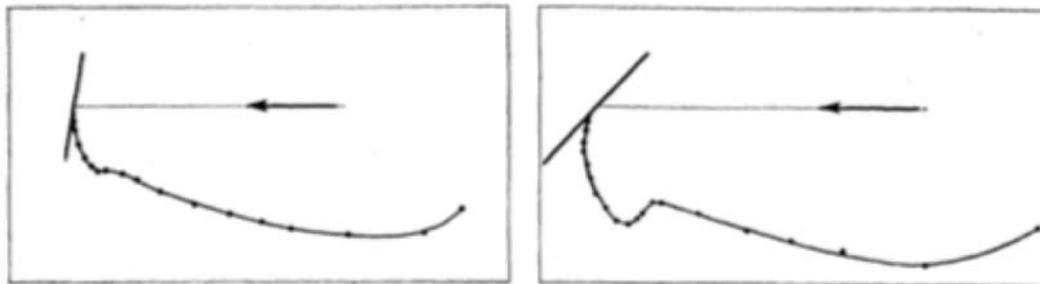
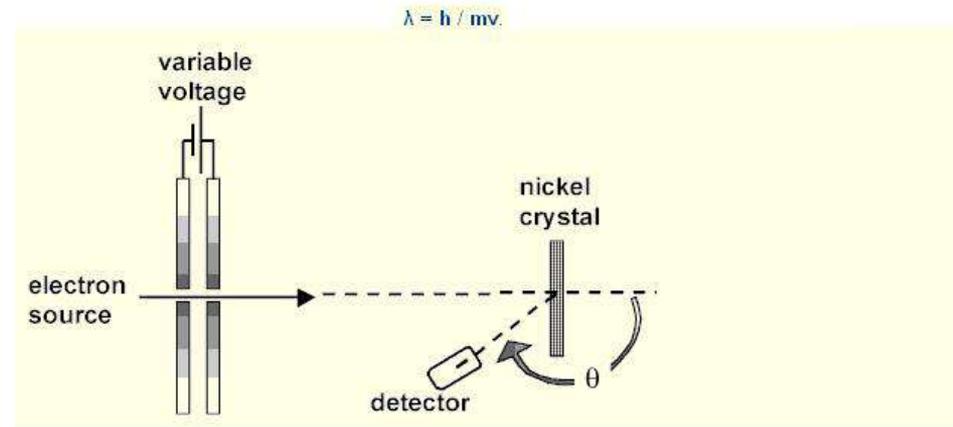


Fig. 2. Cross-sectional view of the experimental apparatus—glass bulb not shown.



SCATTERING OF 75 VOLT ELECTRONS FROM A BLOCK OF NICKEL (MANY SMALL CRYSTALS)

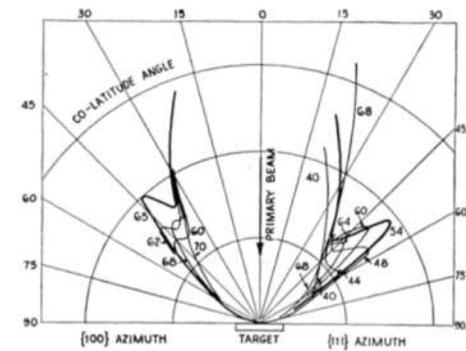


Fig. 10. Scattering curves showing the occurrence of the "54 volt" electron beam and the "65 volt" electron beam. (On each scattering curve is indicated the bombarding potential in volts.)

# Matière ondulatoire

- Vérification expérimentale
  - Thomson (1928)

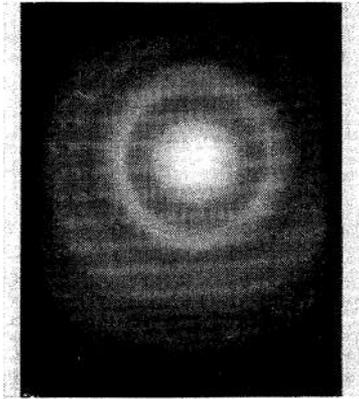


FIG. 4.—Gold.

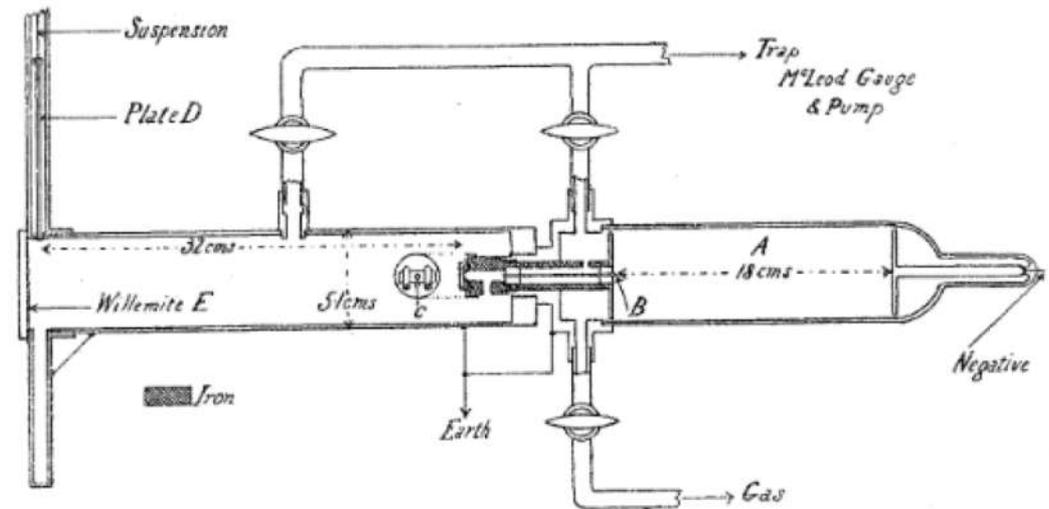
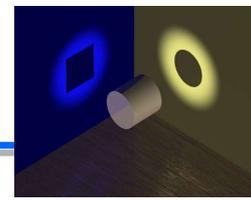


FIG. 1.



# Ni onde ni particule !

« Une particule de matière est une excitation d'un champ »

- Tentative d'analogie

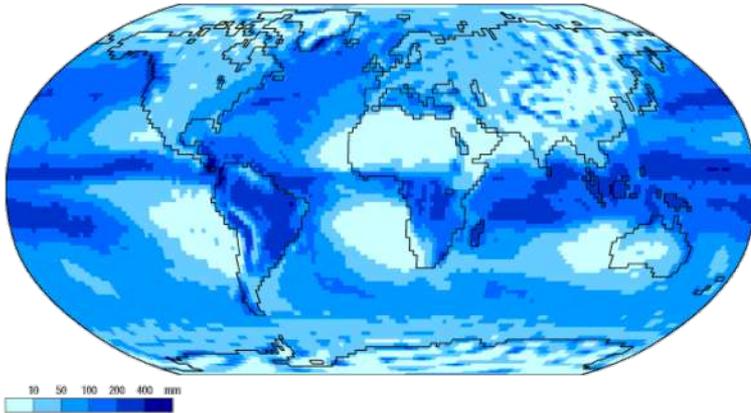
<https://www.youtube.com/watch?v=pnbJEg9r1o8>



# Différent type de champs qui interagissent

## Précipitations

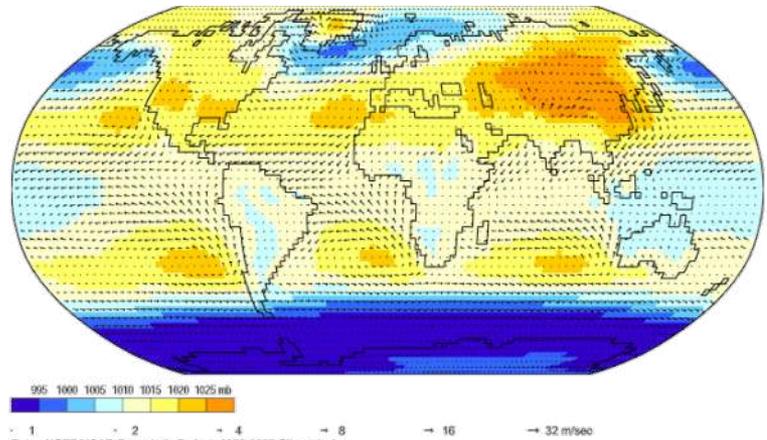
Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

## Pressions et vents au niveau de la mer

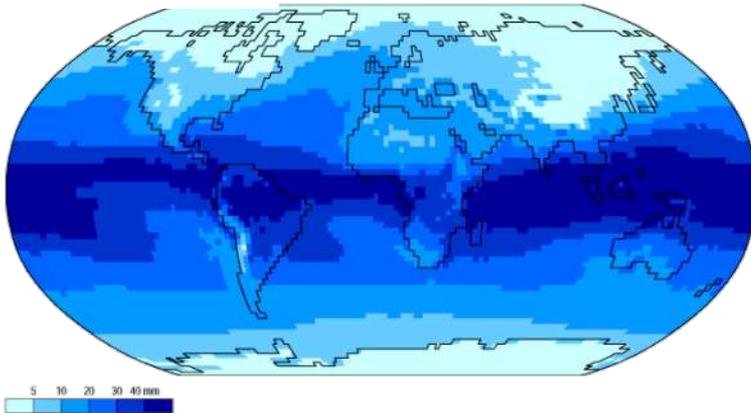
Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

## Eau précipitable

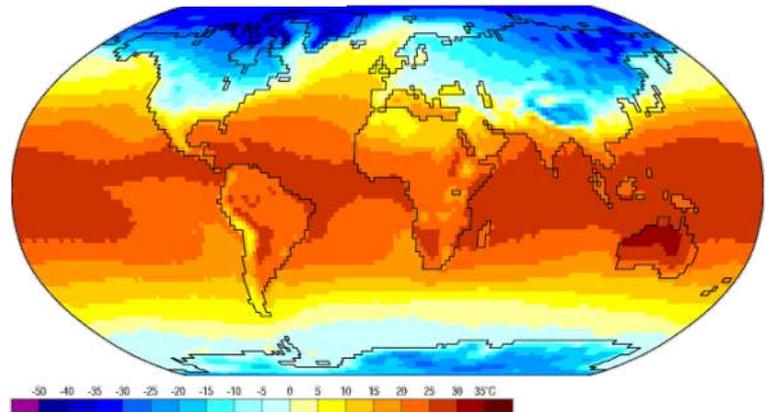
Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

## Température de l'air

Dec

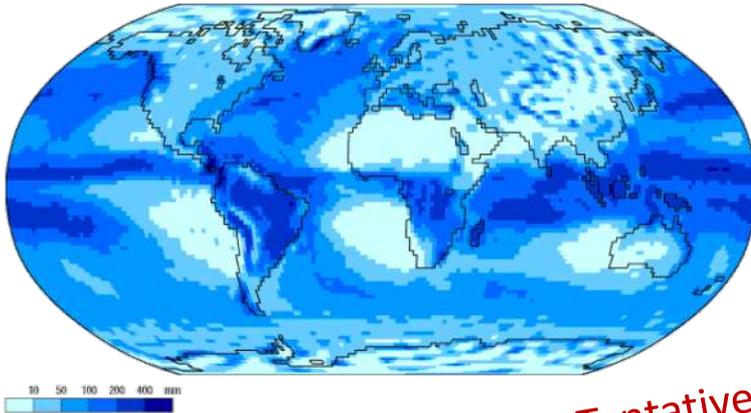


Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

# Différent type de champs qui interagissent

Précipitations

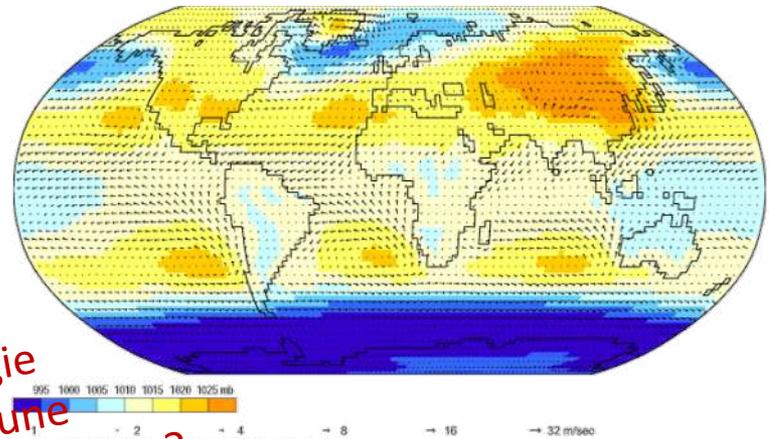
Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

Pressions et vents au niveau de la mer

Dec

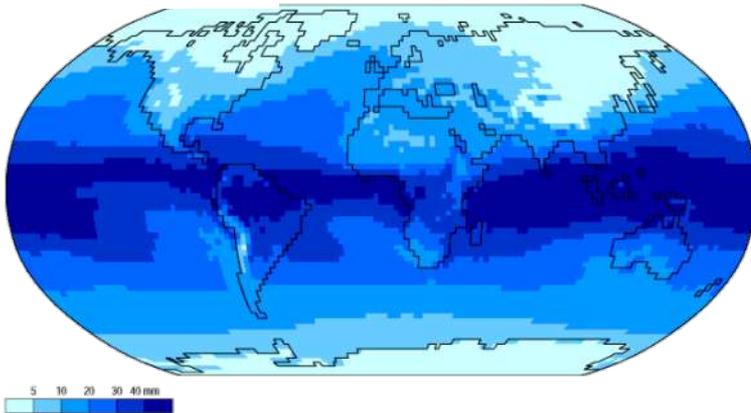


Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

*Tentatives d'analogie  
Un cyclone serait-il une  
« particule d'un de ces champs » ?*

Eau précipitable

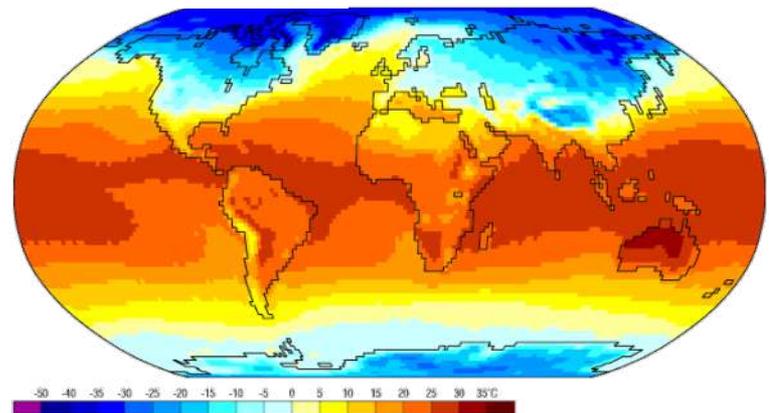
Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

Température de l'air

Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

# Exemple de l'électromagnétisme

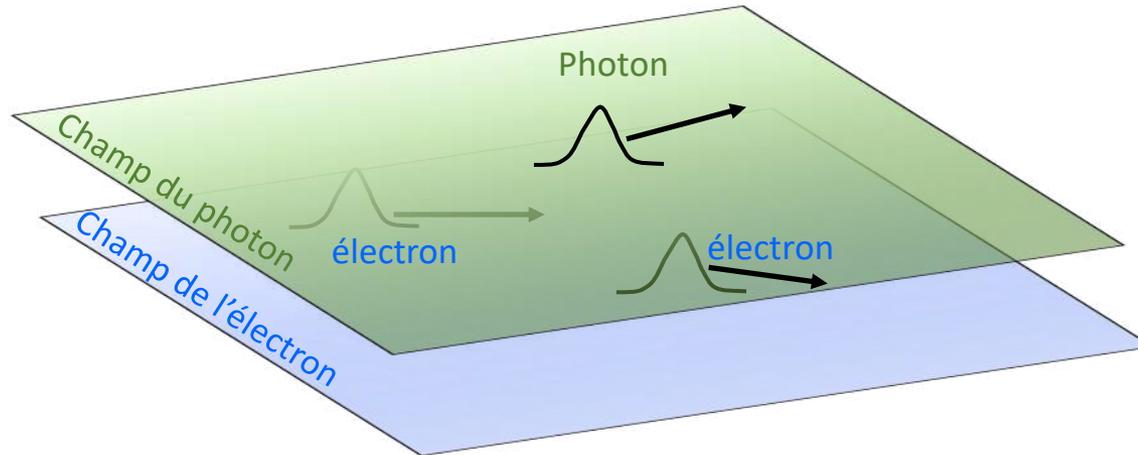
---

- Les champs de l'électron et du photons existent en tout point de l'espace
  - Ces champs interagissent
- Le champ de l'électron peut transférer une partie de son énergie au champ du photon et, ainsi, faire apparaître un photon (l'excitation du champ)... Et inversement.
- On attribue à Lavoisier la phrase « Rien ne se perd, rien ne se crée mais tout se transforme »
  - Ici, on peut faire disparaître une particule ou en faire apparaître... Ce ne sont que des excitation de champ.
  - Il faut que l'énergie soit conservée

$$E = mc^2 \quad \text{Encore Einstein}$$

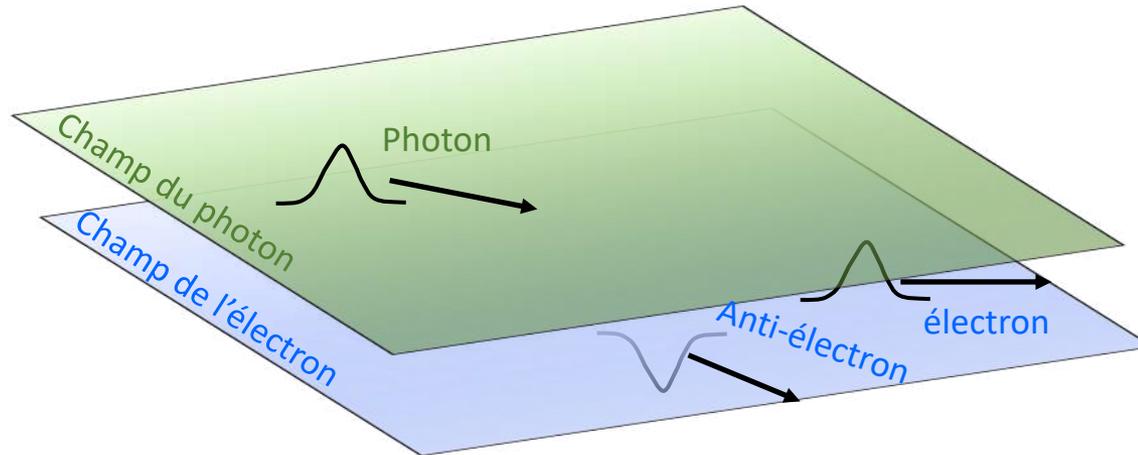
# Exemple de l'électromagnétisme

- Un électron peut « exciter » un photon en changeant de trajectoire



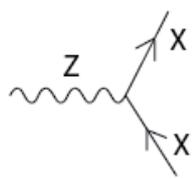
# Exemple de l'électromagnétisme

- Un photon peut disparaître en émettant un électron et un anti-électron

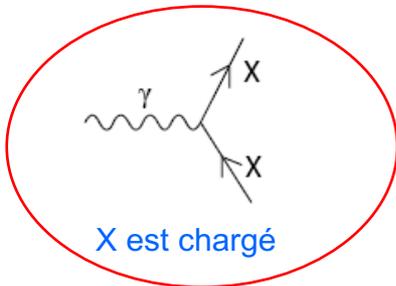


# Les transferts possibles

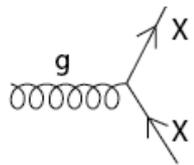
- Moyennant conservation de l'énergie, de la charge...



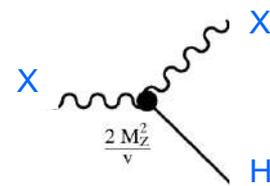
X est un fermion



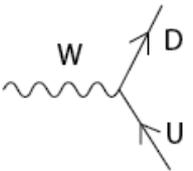
X est chargé



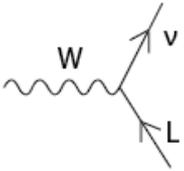
X est un quark



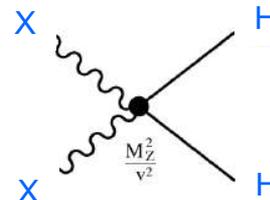
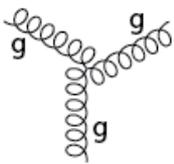
X est boson Z ou W



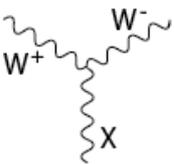
U est un quark de type « haut »  
D est un quark de type « bas »



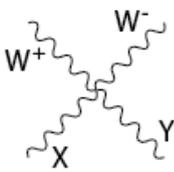
L est un lepton  
nu est le neutrino correspondant



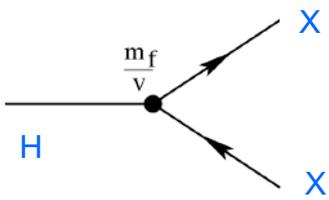
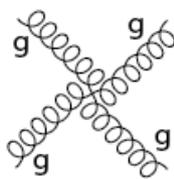
X est boson Z ou W



X est un photon  
ou un boson Z



X et Y sont deux boson  
électrofaibles de charge  
totale nulle.



X est un fermion

# Les particules



2 quarks up et 1 down forment le proton

1 quark up et 2 down forment le neutron

Tous les atomes sont composés à partir de ces particules qui sont des « excitations de champs ».

# Les particules

---



Le photon est le « quanta » de lumière. Il permet aux charges de s'attirer ou de se repousser.

# Les particules

---

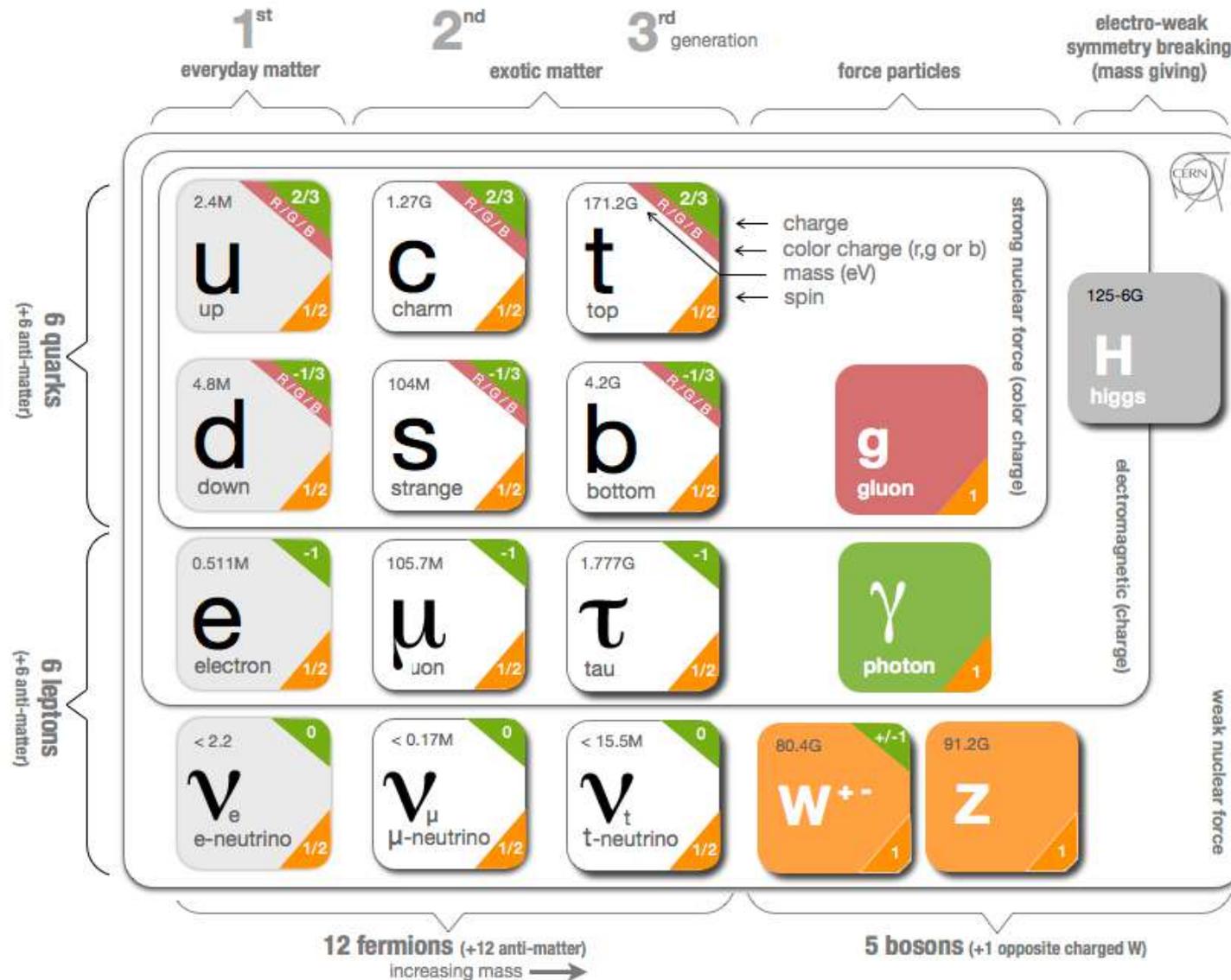


Le gluon permet au quarks de rester soudés dans le noyau

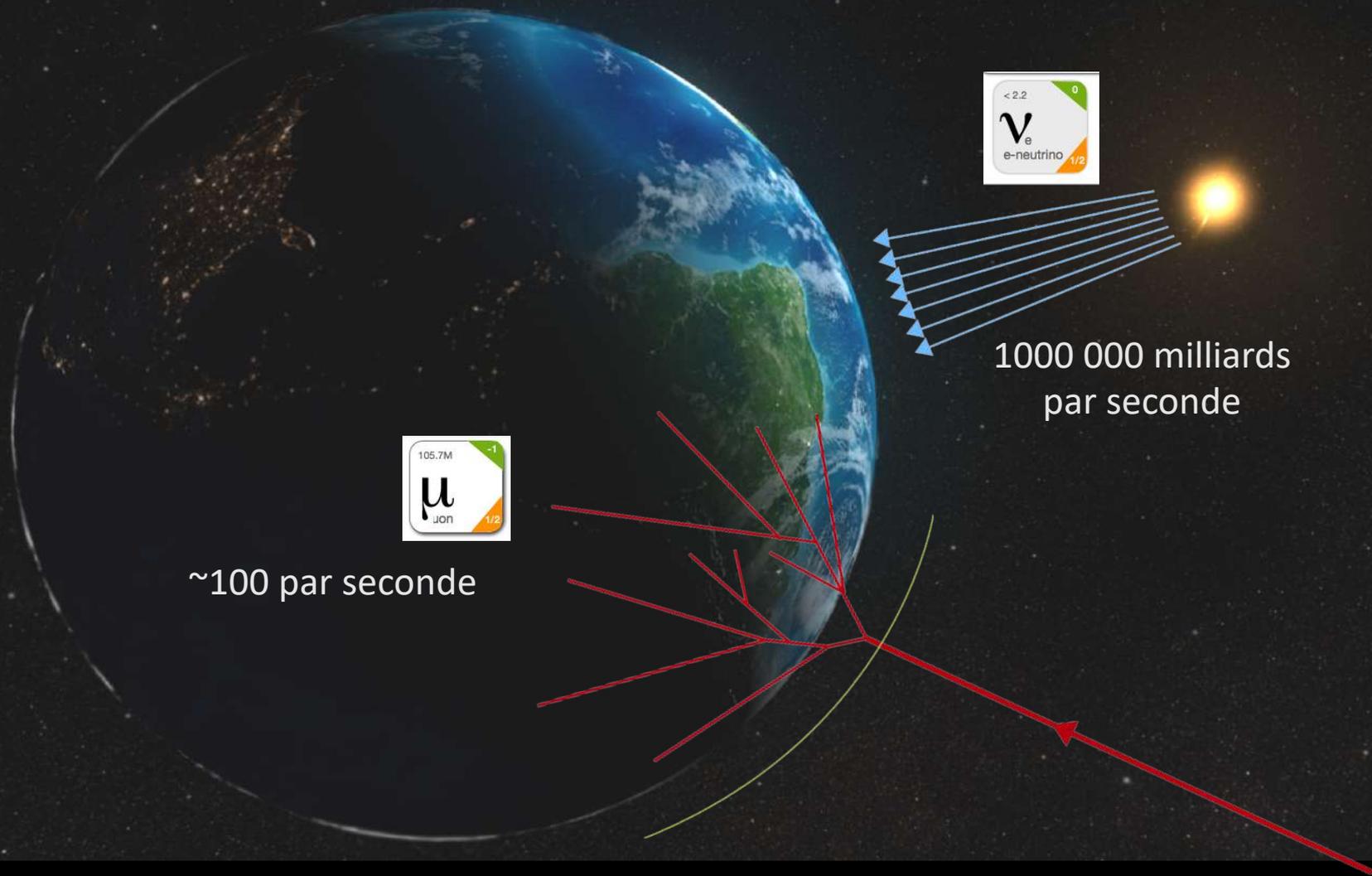


Le photon est le « quanta » de lumière. Il permet aux charges de s'attirer ou de se repousser.

# Les particules

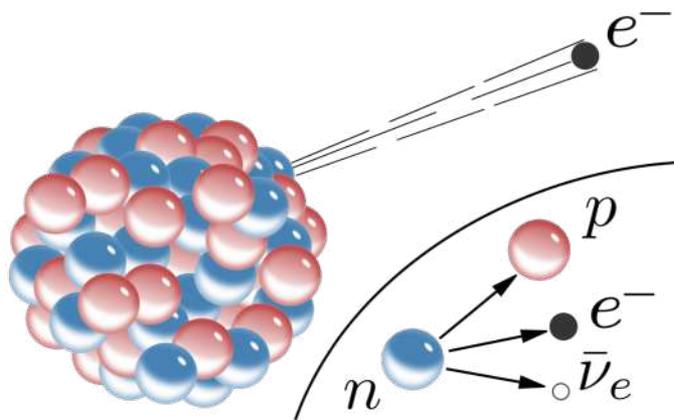
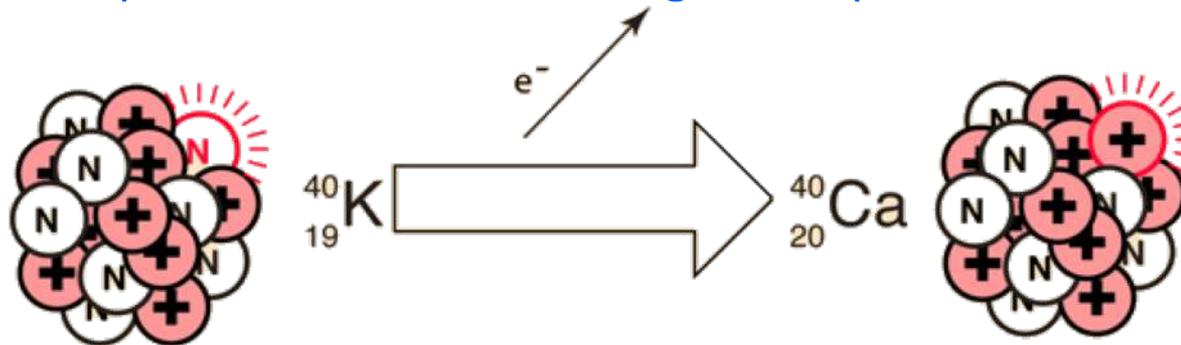


# Des particules élémentaires vous traversent

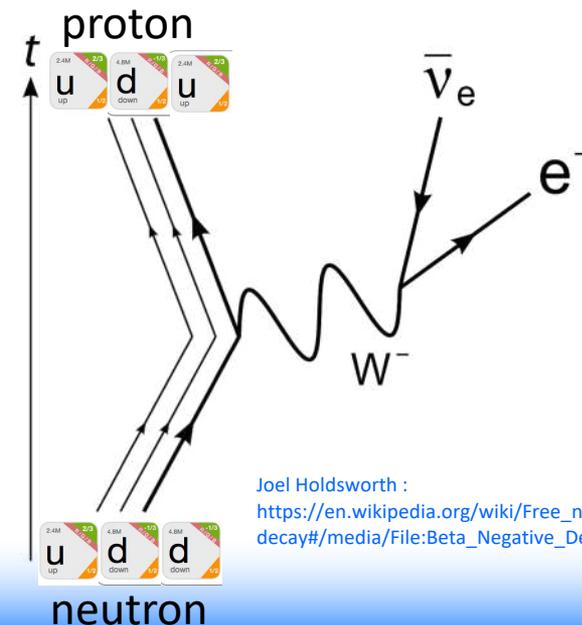


# Transformation... dans notre corps

- Durée de vie du potassium 40: 1,248 milliard d'années
- Abondance naturelle : 0,01167 % de tous les potassium
- Dans notre corps : environ 5000 désintégrations par seconde

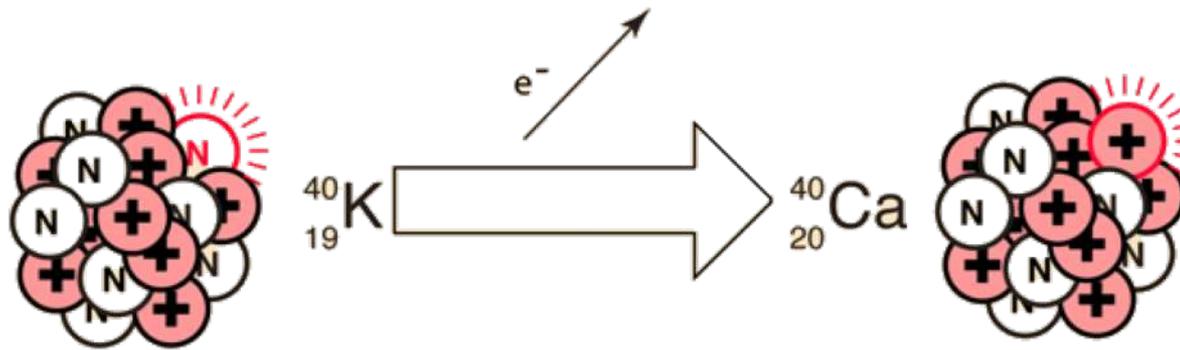


By Inductiveload - Own work, Public Domain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2859203>



Joel Holdsworth :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Free\\_neutron\\_decay#/media/File:Beta\\_Negative\\_Decay.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Free_neutron_decay#/media/File:Beta_Negative_Decay.svg)

# Transformation... dans la Terre



- Une désintégration de ce type libère une énergie d'environ  $10^{-13}$  Joules
- Au total dans le noyau terrestre, on peut estimer la puissance fournie à  $\sim 8-10 \cdot 10^{12}$  Watts



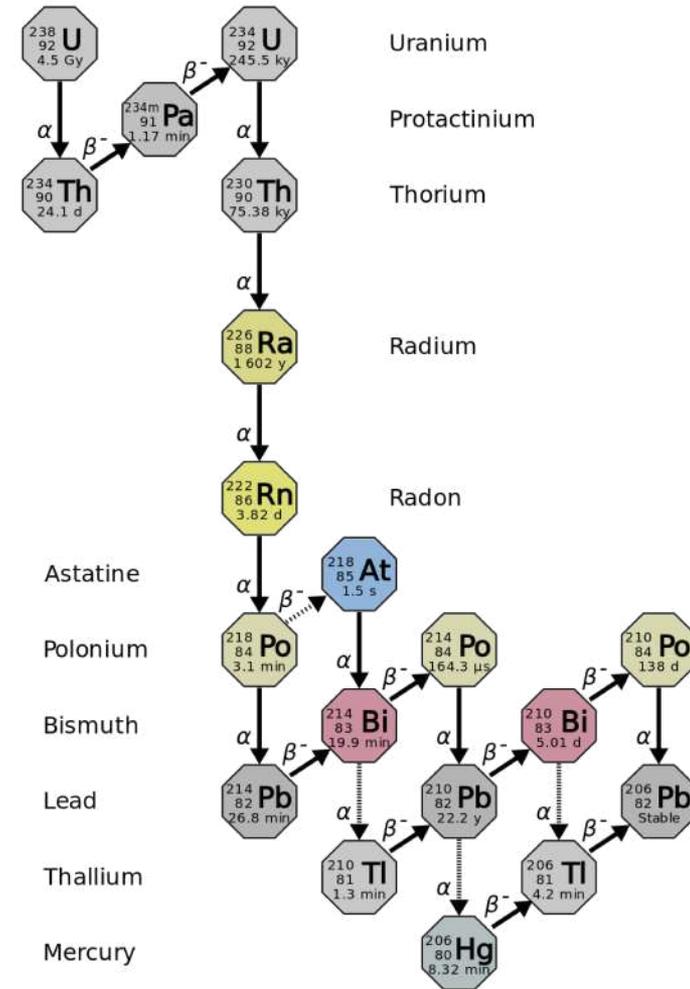
# Transformations



- Dans certaines montres, la désintégration du Radium fournissait l'énergie nécessaire pour exciter une peinture phosphorescente à base de Sulfure de Zinc.



Par Arma95 — Travail personnel, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9502836>

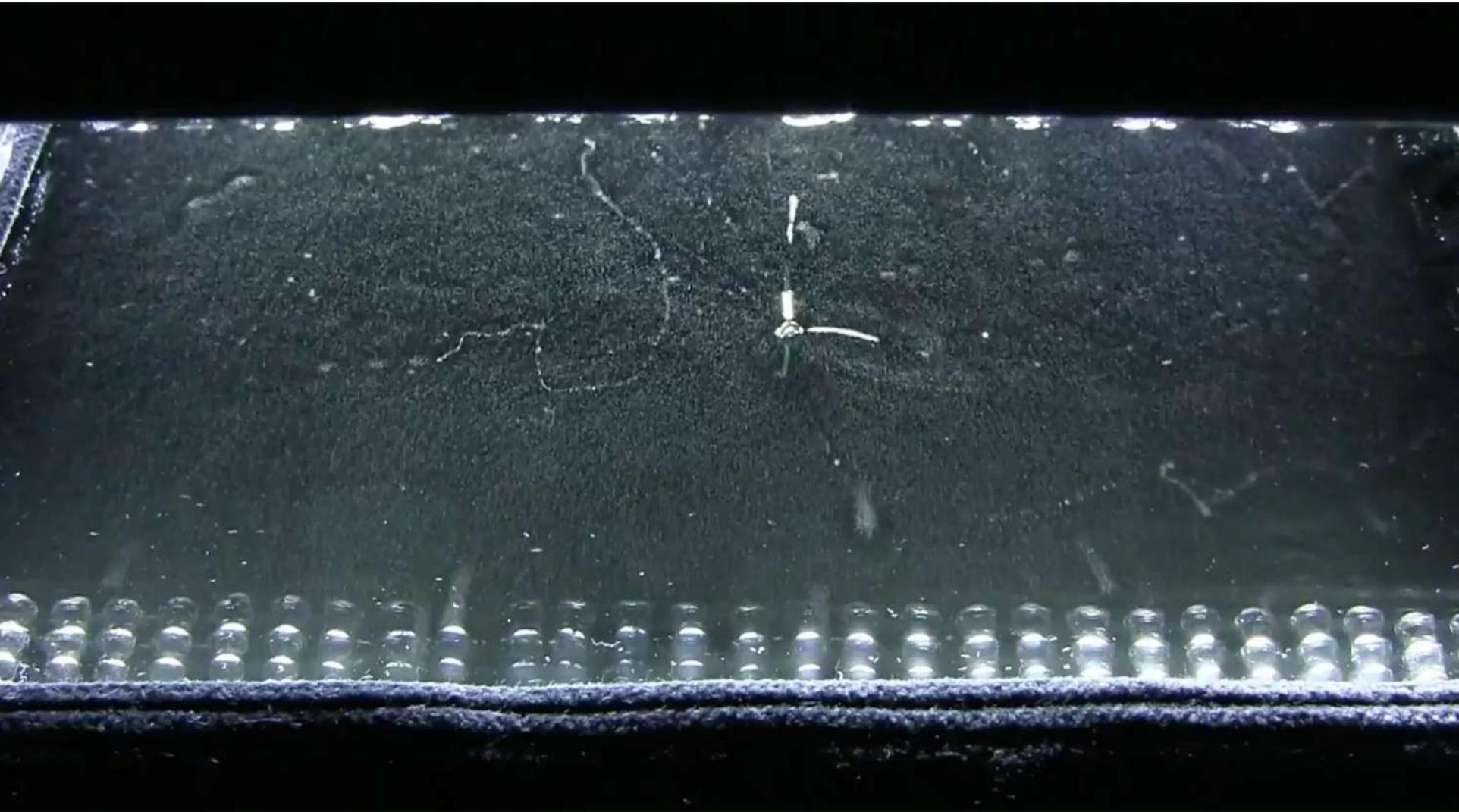


By User:Tosaka - File:Decay chain(4n+2, Uranium series).PNG, CC BY 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33293646>

Radium Girls: Women and Industrial health reform, 1910–1935,  
 ISBN 978-0-8078-4640-7

# Chambre à brouillard

---



# Conclusion

---

- La lumière n'est ni ondulatoire, ni corpusculaire. Elle est formée d'excitations d'un champ
- La matière est également formée de multiples excitations de ce type
- Il peut y avoir des transformations d'une excitation vers une autre moyennant quelques règles
  - Conservation d'énergie, de charge...
- Le monde qui nous entoure est profondément dynamique, en perpétuelle mutation, même au niveau des particules élémentaires
- Nous comprenons certains aspects... Mais il reste beaucoup à comprendre

# Conclusion

---

