

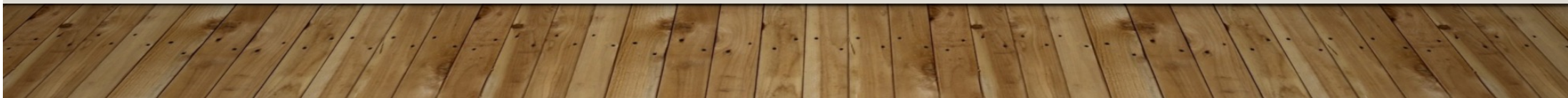
# UNE HISTOIRE DE L'OPTIQUE

---

« LA PHYSIQUE POUR TOUS » SAISON 5 : CYCLE D'ÉTÉ 2023

R. EBER

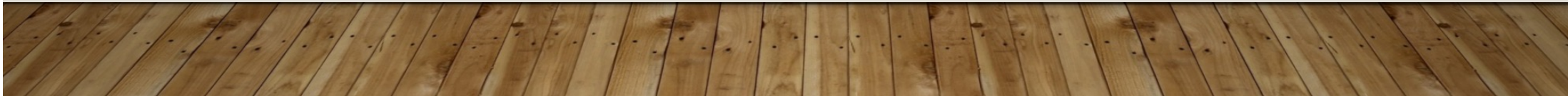
[REGINE.EBER@MAISONS-POUR-LA-SCIENCE.ORG](mailto:REGINE.EBER@MAISONS-POUR-LA-SCIENCE.ORG)



# EPISODE 4 : ONDES LUMINEUSES ? OU PHOTONS ?

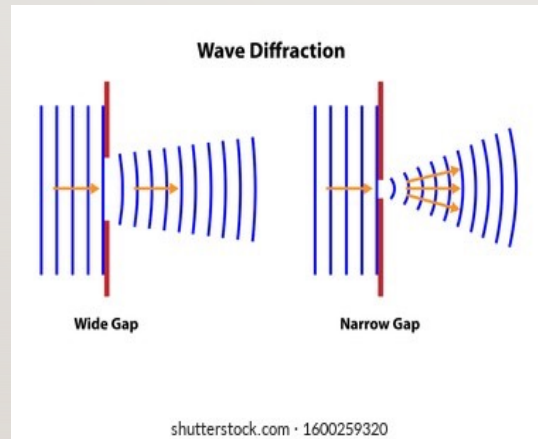
---

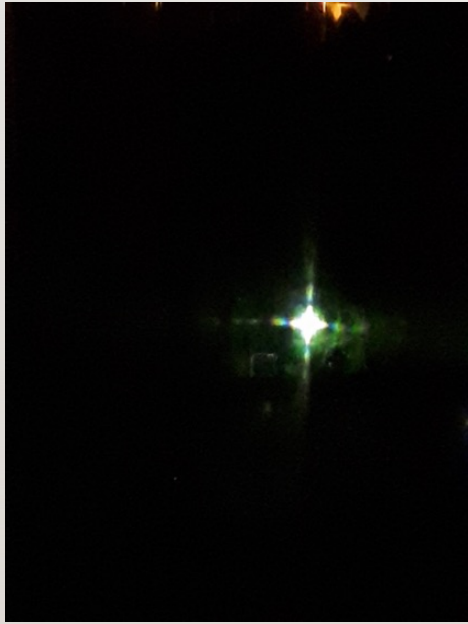
DU MODÈLE ONDULATOIRE À LA DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE



# PETIT FLASHBACK : LA DIFFRACTION (« L'INFLEXION ») DE LA LUMIERE DÉCRITE PAR FRANCESCO MARIA GRIMALDI, 1618-1663

- Découvre la diffraction par un cheveu puis essaie de trouver la nature de la lumière qui permet d'en rendre compte (publié en 1665)
- Démarche empiriste
- La diffraction ne dépend pas de la nature de l'obstacle, juste de sa taille.



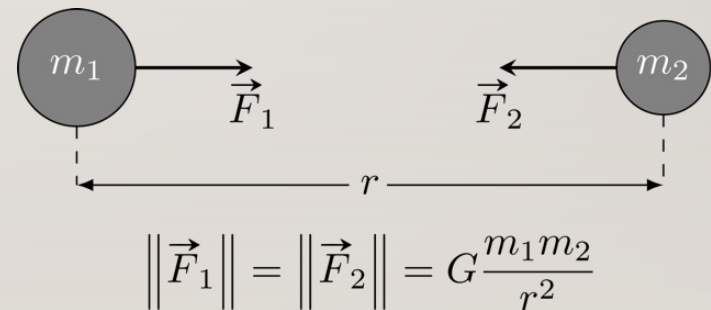
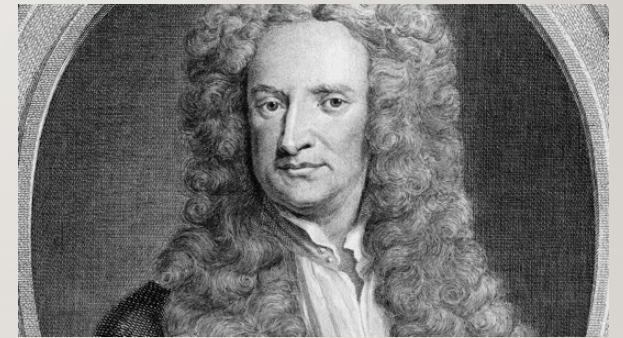


- Diffraction par un rideau, facile à observer

# CONTEXTE : ISAAC NEWTON (1642-1727) ET LES „PRINCIPIA“ 1687 (LES PRINCIPES MATHÉMATIQUES DE LA PHILOSOPHIE NATURELLE)

---

- Grâce aux „trois lois de Kepler“ qui décrivent le mouvement des planètes du système solaire autour du Soleil,
  - Grâce à la théorie de la fronde (lance pierre) de Huygens,
- Newton élabore un ensemble de lois du mouvement UNIVERSELLES, dont la fameuse loi de la gravitation universelle, qui explique comment une planète peut orbiter éternellement autour d'une étoile.

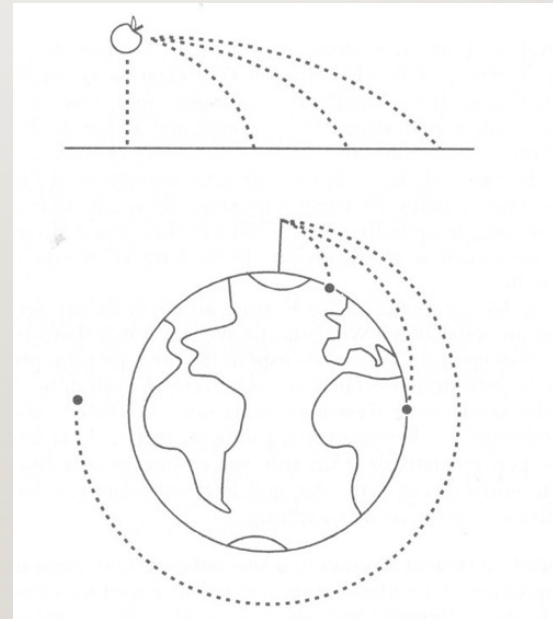


## ... LES LOIS DU MOUVEMENT EN DEUX MOTS

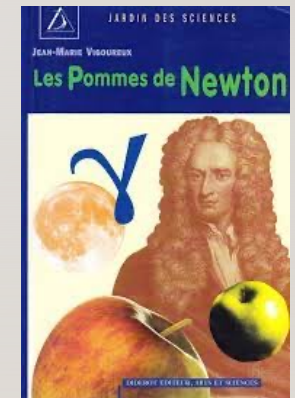
---



Si un objet est soumis à des forces qui se compensent (il n'est soumis à aucun frottement,) son mouvement sera éternel.



„les pommes de Newton“, JM Vigoureux, Diderot éditeur 1997, p206



## ...LES SUCCES DE NEWTON

---

- La Terre est renflée à l'équateur/aplatie aux Pôles
  - Jean Richer : Expedition de Cayenne 1672 battement du pendule
  - 1736 expédition en Laponie (Maupertuis) et en Equateur (La Condamine)
- Déterminisme des équations du mouvement de Newton
- Le retour prévu en 1758 par Newton de la comète de Halley



## .... ET LES QUESTIONS...

---

- Mouvement de Mercure ?

→ Relativité générale 1915 par Einstein  
(1879-1955)

- Mouvement de Uranus ?

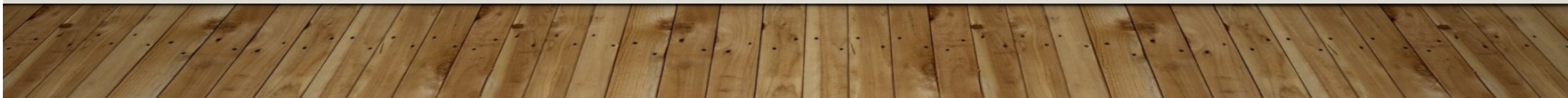
→ Découverte de Neptune 1846



# NEWTON EN OPTIQUE (1704)....

---

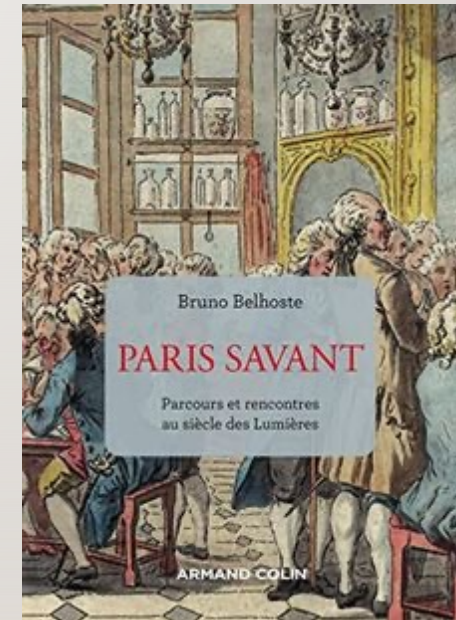
- „Théorie de l'émission“ : La lumière est faite de corpuscules qui sont accélérés quand ils pénètrent une matière dense (forces d'attraction).
- Conséquence : la lumière est plus rapide dans les milieux denses.
- La lumière ne fait pas de diffraction contrairement au son puis „théorie des accès“.
- La lumière du Soleil est faite de toutes les 7 couleurs de l'arc en ciel et les particules de lumière bleue sont les moins lourdes (car les plus déviées par un prisme).



# CONTEXTE : LE « SIÈCLE DES LUMIÈRES » (18<sup>ÈME</sup> SIÈCLE)

---

- Le français devient la langue du savoir savant
- Voltaire et Emilie du Châtelet font connaître Newton en Europe continentale
- Encyclopédie de Diderot et D'Alembert 1751 : lutte contre l'autoritarisme, et l'ignorance, mise en avant des savoirs-faire.
- Développement de la physique mathématique donc on ne cherche plus la nature des choses mais juste des relations → on ne se bat plus avec l'Eglise



# LE DEBUT DU 19<sup>ÈME</sup> SIECLE : RÉVOLUTION ET EMPIRE EN FRANCE

---

- On veut une école pour former des citoyens : laïque
- La physique enseignée sera déterministe, certaine et universelle
- Ordre, clarté, raison, obéissance à des lois immuables
- Collège royal → Collège de France
- Académies → Institut de France
- Jardin du roi → Museum d'histoire naturelle
- Abbé Grégoire fonde le CNAM
- Ecole centrale des ponts et chaussées fondée → polytechnique
- Fonde les lycées et les facultés



# LA „SOCIETE D'ARCUEIL“: UN REPAIRE DE NEWTONIENS EN FRANCE (APOGEE ENTRE 1806 ET 1822)

---

- Peu à peu les théories de Newton sont débarrassées de l'intervention de Dieu (plus de « cause première »). → On réinterprète « hypothèses non fingo » : il suffit d'observer pour connaître.
- L'univers devient infini et la matière éternelle.
- Laplace est partisan d'une mathématisation complète de la physique (après observations)
- Pierre-Simon de Laplace (1749-1829) et Claude Louis Berthollet (1748-1822)



# 1723 : LEONHARD EULER (1707-1783) → THÉORIE ONDULATOIRE DE LA LUMIERE PAR ANALOGIE AVEC LE SON

---

- Il défend la théorie ondulatoire de Huygens (1690) car :
  - Les sources lumineuses ne s'épuisent pas
  - Pas de pb d'interpénétration entre les rayons lumineux
  - Pas de pb de pénétration dans la matière
- Nouveauté : chaque couleur présente dans un arc-en-ciel correspond à une fréquence différente. Suivant le nb de fois qu'un œil est percuté par s, il perçoit une couleur différente.
- Par analogie avec des cordes vibrantes, où chaque note de musique correspond à une fréquence différente
- « Nova Theorie de la lumière » 1746 + « Lettres à une princesse d'Allemagne » 1770:.



# DES ANIMATIONS DE L'UNIVERSITÉ DE NANTES SUR LES ONDES

---

- Onde longitudinale → le son par exemple

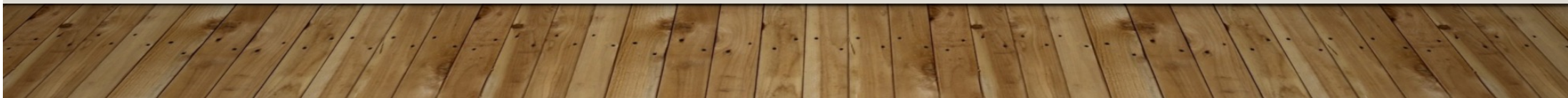
[https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde\\_longitudinale.php](https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde_longitudinale.php)

→ La déformation est parallèle à la direction de propagation

- Onde transversale :

[https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde\\_transversale.php](https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde_transversale.php)

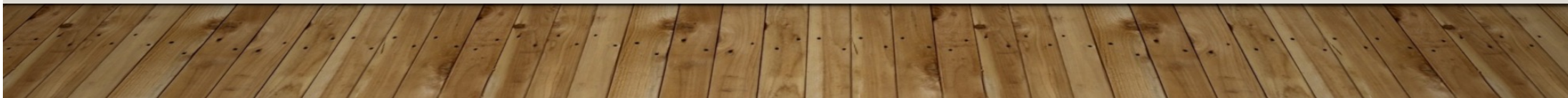
→ La déformation est perpendiculaire à la direction de propagation



# L'ONDE SONORE (LONGITUDINALE) PAR ANALOGIE AVEC DES VAGUES

---

- 1705 : le son ne se propage pas dans le vide (Francis Hawksbee 1660-1713)
- 1706 : le son contourne les obstacles mais pas la lumière (Newton) → diffraction
- 1738 : mesure de la vitesse du son dans l'air : 337 m/s
- 1743 : dans l'eau le son ne change pas sa fréquence mais son intensité baisse (Jean-Antoine Nollet 1700-1770)
- 1747 : les harmoniques par d'Alembert en lien avec les modes de vibration d'une corde
- 1826 : mesure de la vitesse du son dans le lac Léman 1435 m/s



# LES ONDES MECANIQUES (VAGUES, SON) : RAPPELS

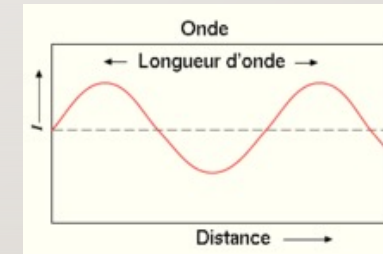
---

- La fréquence  $f$  est le nb de déformations/vibrations/vagues produites par s (en Hz).

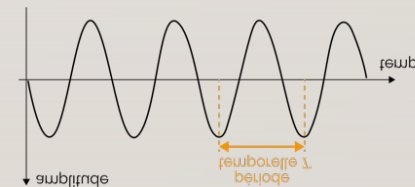
$f$  ne dépend pas du milieu en général.

- La vitesse  $v$  de l'onde dépend du milieu.
- Plus cette vitesse est élevée, plus chaque vague va s'étale : la „longueur d'onde“  $\lambda$  (en m), définie comme la longueur d'une vague entière, va être grande.
- On montre que  $v = \lambda * f$

- Propriété d'une onde : double périodicité
  - Si on fixe le temps (photo) :



- Si on fixe l'espace (bouée, canard) :





# THOMAS YOUNG (1773-1829) LE POLYMATHE NEOPHYTE

---

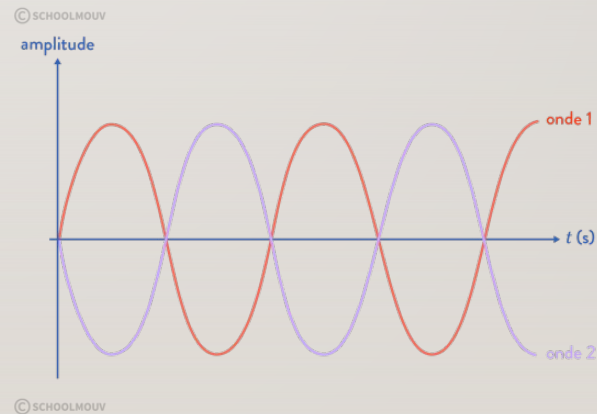
- 1817 article « théorie des couleurs » pour l'Encyclopaedia Britannica
- Il comprend les interférences lumineuses puis :
  - Explique les anneaux de Newton et s'en sert pour déterminer la longueur d'onde de toutes les couleurs de l'arc-en ciel
  - Prouve la nature ondulatoire de la lumière avec sa fameuse expérience des trous d'Young



# ADDITIONNER DEUX ONDES SINUSOÏDALES

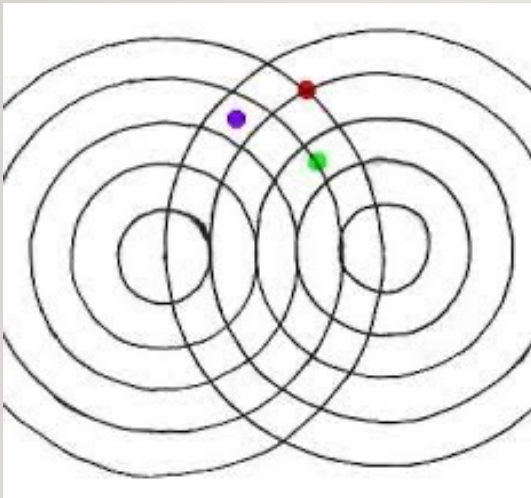
Si en un point arrivent deux ondes „en phase“ (séparées d'un nb entier de longueur d'onde) alors ce point est très éclairé. On parle en ce point d'interférences „constructives“

Su au contraire en un point arrivent deux ondes „en opposition de phase“ (séparées d'un nb impair de demie-longueurs d'onde) alors ce point apparaîtra sombre. On parle d'interférences „destructives“.



# INTERFERENCES A DEUX ONDES

---



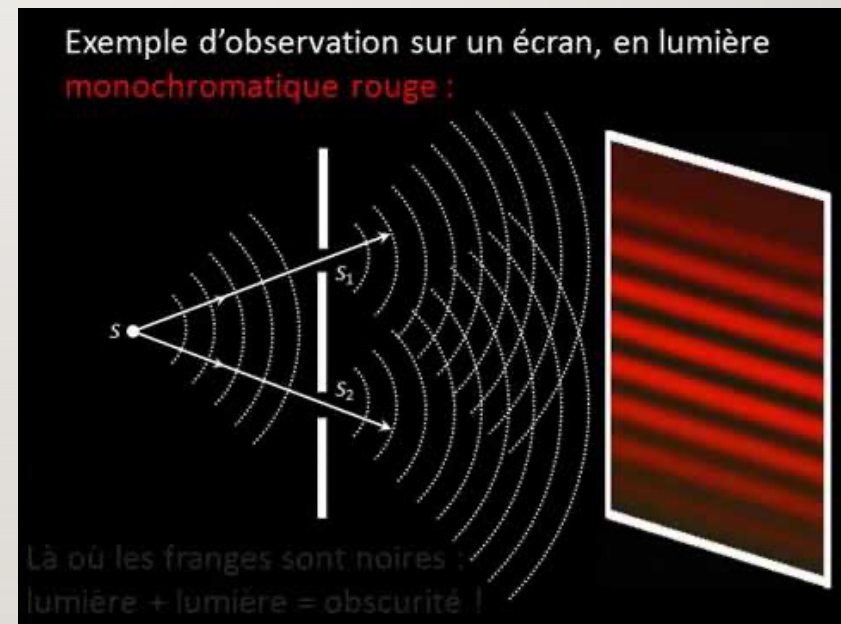
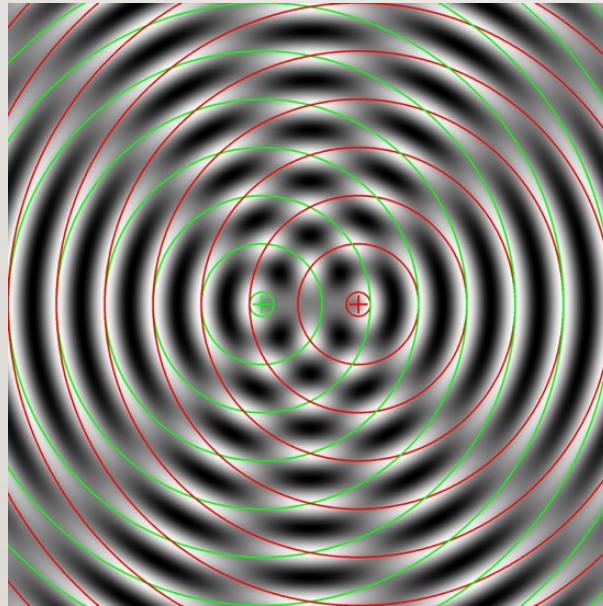
- Point rouge : interférence constructive
- Point violet : interférence constructive
- Point vert : interférence destructive

# EXPERIENCE DE „TROUS D'YOUNG“ 1807

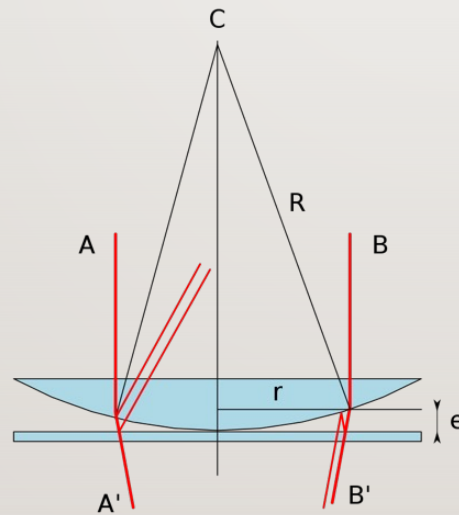
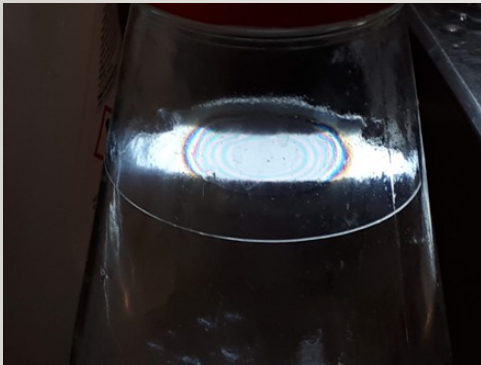
Interfrange  $i = \lambda D/a$

Permet de confirmer les longueurs d'onde de chaque couleur

Les rayons lumineux sont perpendiculaires aux front d'onde.



# L'EXPLICATION DES ANNEAUX DE NEWTON 1804



Le rayon des anneaux sombres  
vus par réflexion est :

$$r_k = \sqrt{(k \cdot R \cdot \lambda)}$$

Young en déduit les longueurs  
d'onde de toutes les couleurs  
de l'arc-en ciel (il peut  
déterminer les longueurs  
d'onde  $0,70 \mu\text{m}$  pour le rouge  
et  $0,56 \mu\text{m}$  pour le violet). .

<https://www.youtube.com/watch?v=QenZTqVq4OM>

## PETITE REMARQUE EN PASSANT ...

---

- Young remarque que si l'on remplace la lame d'air par une lame d'eau, les anneaux se resserrent

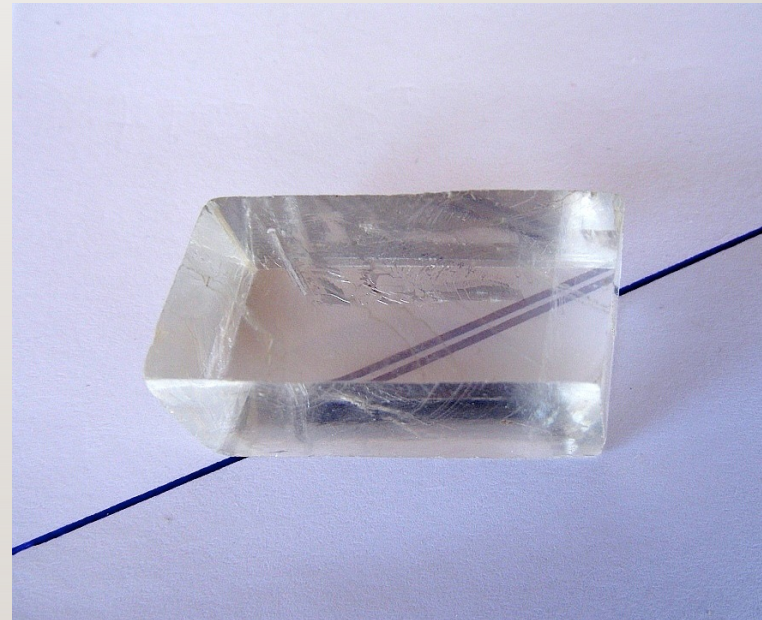
⇒ il faut moins d'épaisseur pour obtenir le même retard : la vitesse de la lumière est donc plus faible dans l'eau que dans l'air.

- CONFIRMATION DE LA THEORIE ONDULATOIRE DE HUYGENS, avec un milieu de propagation pour les ondes : l'ETHER.
- ON NE PEUT PAS (encore) ENVISAGER DE PROPAGATION D'ONDE DANS LE VIDE.

# PETIT FLASHBACK... LA BIREFRINGENCE DU SPATH D'ISLANDE

---

- Erasme Bartholin (1625-1698) est le premier à remarquer la biréfringence de certains cristaux, qui donnent DEUX images réfractées, en 1669, qualifiées „d'ordinaire“ et „d'extraordinaire“..

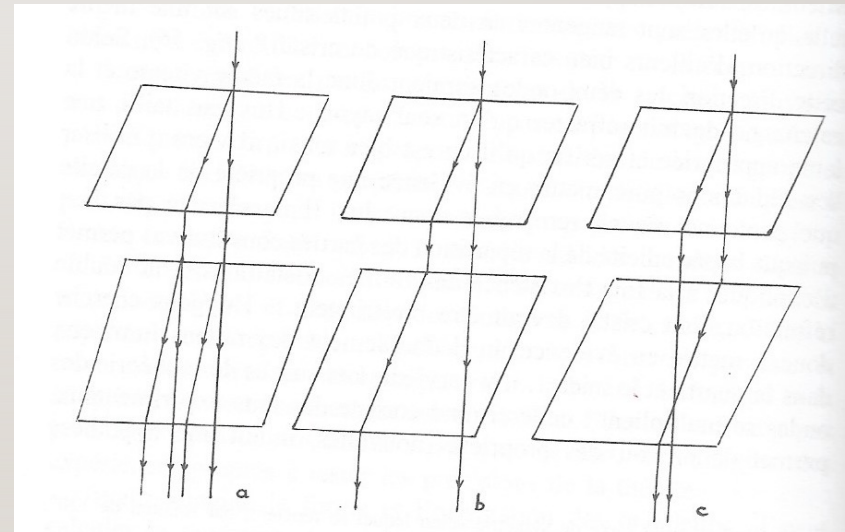


## SUITE DU FLASHBACK...

---

- Huygens décrypte partiellement le phénomène : il trouve une construction qui permet de tracer les deux rayons réfractés. La vitesse du rayon ordinaire est la même partout et celle du rayon extraordinaire dépend de la direction.
- Mais il ne comprend pas certains résultats de la superposition de deux cristaux.
- Notons que l'onde lumineuse de Huygens est longitudinale.

- [http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/jacques\\_charrier/tp/polaro/proulogue.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/jacques_charrier/tp/polaro/proulogue.html)





# ETIENNE LOUIS MALUS (1775-1812) ET LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE 1808

---

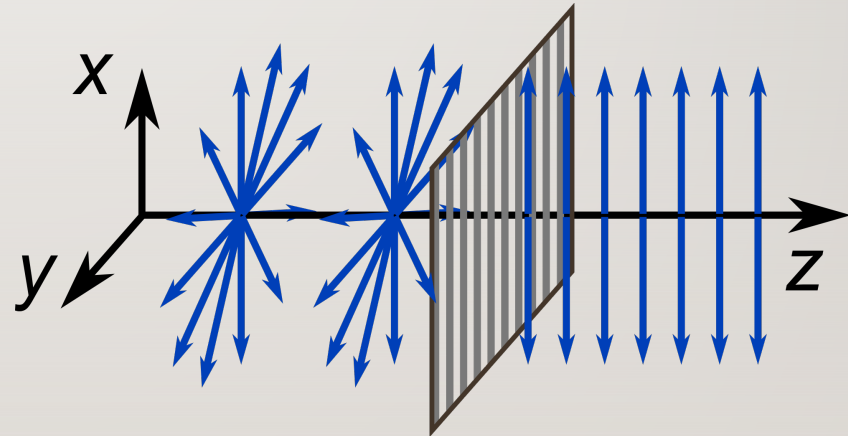
- Concours lancé par l'Institut en 1808 sur la biréfringence
  - Malus reprend les expériences de biréfringence et confirme Huygens et démonte Newton. Il refait les expériences avec deux cristaux de calcite superposés.
  - Expérience avec la lumière réfléchie par une fenêtre du palais du Luxembourg. Il refait alors des expériences de réflexion de la lumière avec un cristal et de l'eau
- Pour certains angles d'incidence la lumière réfléchie a les mêmes propriétés que celle qui émerge d'un cristal de spath. Il va appeler cette propriété « polarisation de la lumière »



# LA THEORIE (NEWTONIENNE) DE MALUS

---

- Théorie de Malus (newtonienne):
  - La lumière est formée de molécules qui ont une forme (idée que l'on trouvait déjà chez Newton)
  - La particule de lumière peut être décrite selon 3 axes : lié au rayon, lié au plan de section principal et lié à sa perpendiculaire
  - À l'entrée du cristal, des forces magnétiques →  
Les molécules de lumière qui ont leur axe b dans le plan de section principal →  $R_o$  et perp →  $R_e$
- Malus remporte le prix de l'Institut.



# AUGUSTIN FRESNEL (1788-1827)

## LE ROYALISTE POLYMATHE VA CONFIRMER YOUNG

---

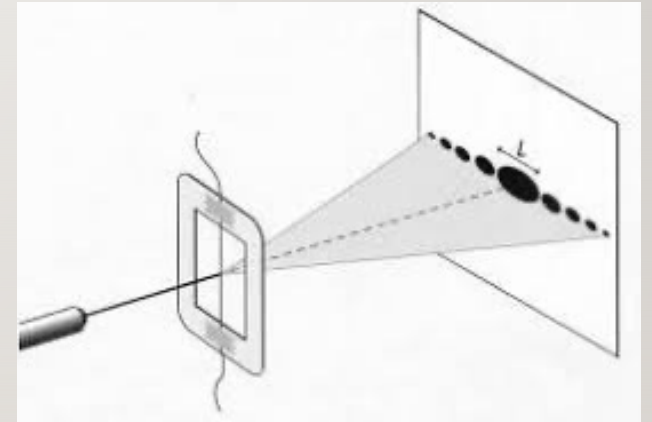
- Polymathe, inexpérimenté en sciences
- Ingénieur des ponts et chaussées
- Muté à Paris au Service des Phares grâce à Arago.
- Lentille de Fresnel 1823



# FRESNEL ET LA DIFFRACTION

---

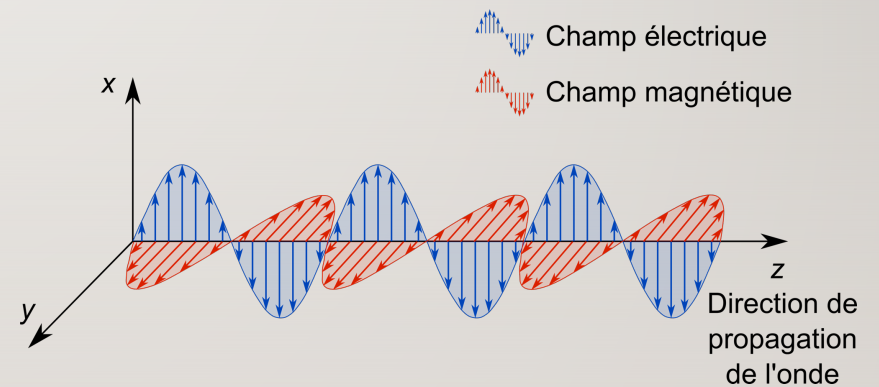
- 1815 : Fresnel l'expérience de diffraction par un fil et explique les franges hyperboliques par une théorie ondulatoire (interférence des ondes lumineuses qui se retrouvent après le fil) → fin de la théorie corpusculaire.
- Idée que Young avait déjà publiée.
- Il reprend ensuite la diffraction avec François Arago (1786-1853) → il remporte le prix de l'Institut en 1819



# FRESNEL ET LA FORME DES ONDES LUMINEUSES : CE SONT DES ONDES TRANSVERSALES (COMME LES VAGUES ET CONTRAIREMENT AU SON)

---

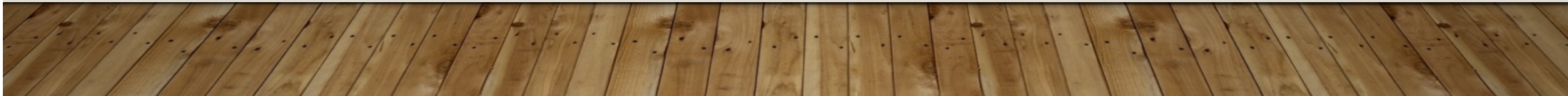
- Depuis 1816, avec Arago, un constat s'impose : on n'observe pas d'interférences entre une onde ordinaire et une onde extraordinaire.
  - En 1818, il a déjà l'explication : les vibrations lumineuses sont transversales (seule possibilité dans une théorie ondulatoire, inspirée par André Marie Ampère 1775 - 1836) ! La polarisation consiste à ne laisser passer que les vibrations qui ont la bonne direction.
  - Arago se sépare de Fresnel car il ne peut pas concevoir des ondes transversales.
- « considérations mécaniques sur la polarisation de la lumière » 1821 dans les Annales de chimie et de physique



# ENTRE 1820 ET 1905 : LES ONDES LUMINEUSES TRIOMPHENT !

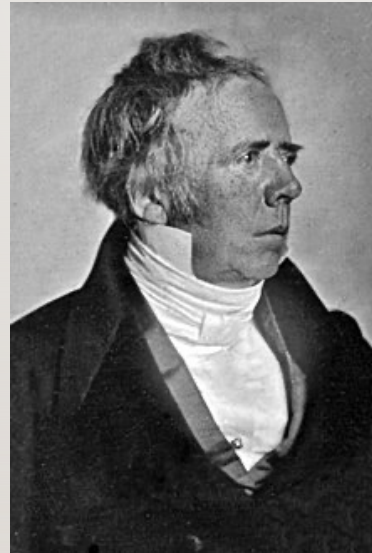
---

- Avec Fresnel, c'est la fin de la lumière corpusculaire.... Jusqu'à Einstein ! On peut faire le rapprochement avec le développement de l'algèbre (onde) par rapport à la géométrie (corpuscule).
- On a du mal à accorder cela avec un fluide, l'éther, qui transmet l'onde de proche en proche. La propagation d'ondes transversales est difficile à expliquer.



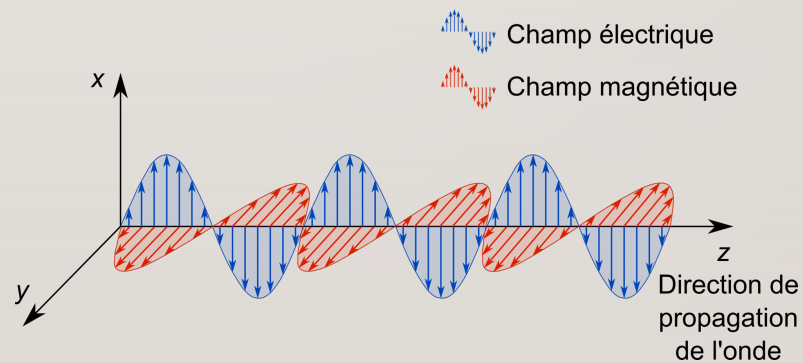
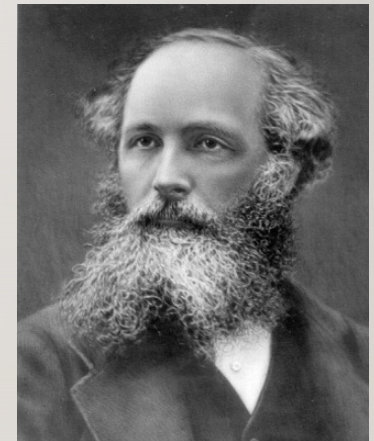
# ENTRE 1800 ET 1830... DÉVELOPPEMENT DE L'ELECTRICITE... SON LIEN AVEC LE MAGNETISME

---



# JAMES CLERCK MAXWELL(1831-1879)

- 4 équations de Maxwell (les ondes électromagnétiques ont une vitesse  $v = 300000 \text{ km/s}$ , ce sont des vibrations transversales comme la lumière)
- La lumière est un cas particulier d'ondes électromagnétiques
- Équations vérifiées par Hertz





# EXPERIENCE DE MICHELSON ET MORLEY 1881 À 1884

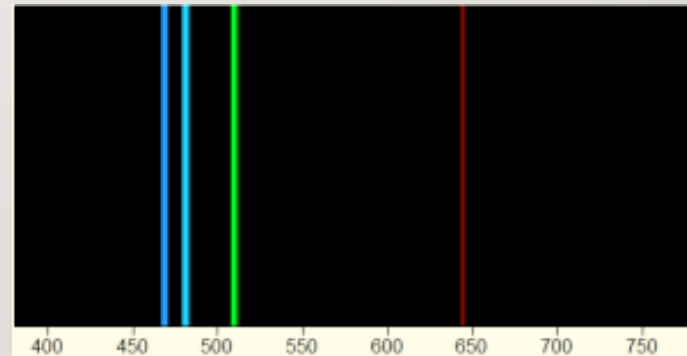
---

- L'éther n'existe pas
- Contraction des longueurs dans le sens du déplacement (facteur de contraction calculé par Lorentz)

# L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE (EXPERIMENTAL)

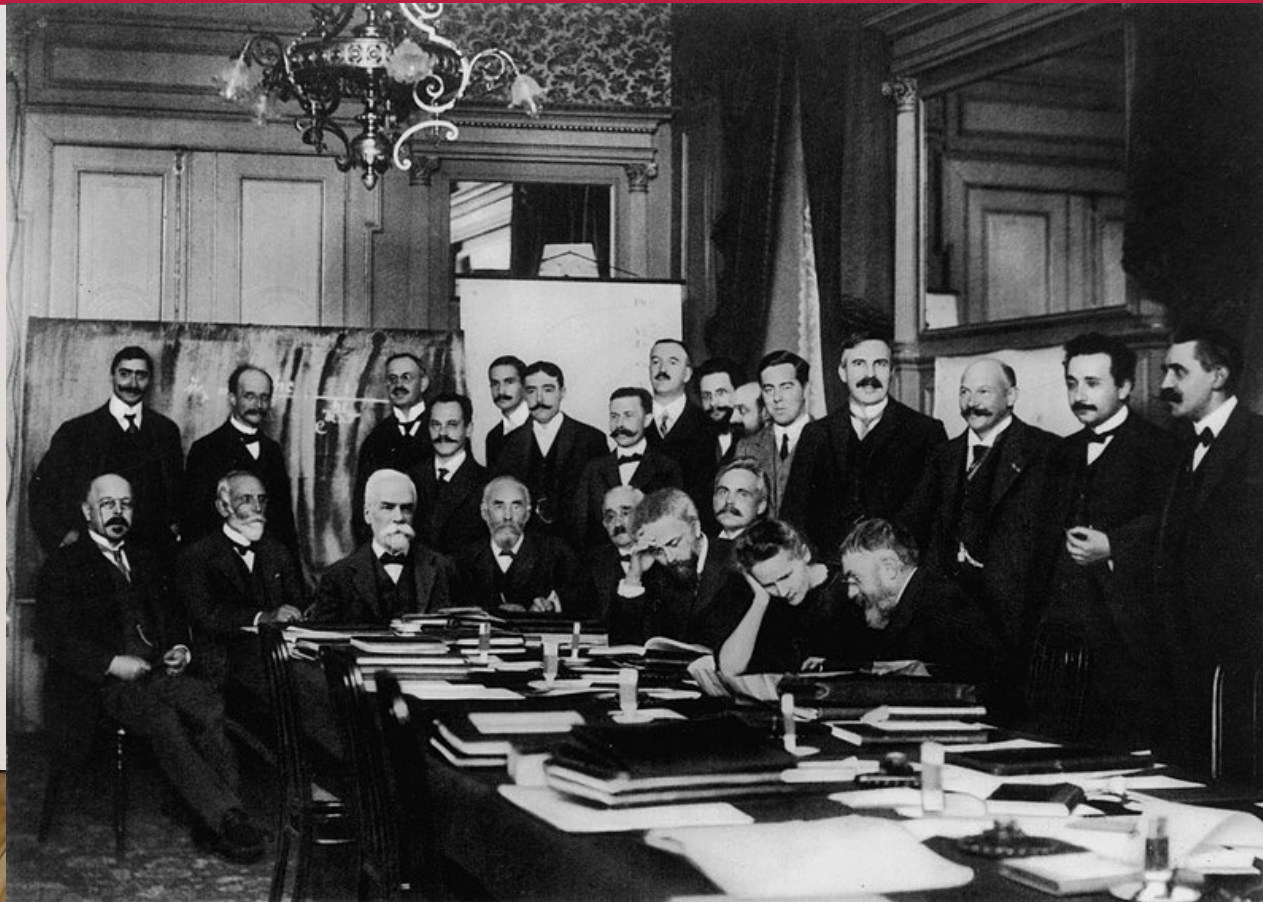
---

- 1887 Hertz : une plaque de métal qui reçoit de la lumière émet des électrons :
  - Existence d'une fréquence seuil
  - Phénomène instantané
  - Énergie des électrons augmente avec la fréquence du rayonnement
  - L'intensité lumineuse ne fait pas varier l'énergie des électrons émis, mais uniquement leur nb
- Einstein 1905 :
  - La lumière est formée de grains d'énergie, les quanta
  - $E = h f$  ( $h = 6,55 \times 10^{-34}$  SI valeur de Planck)
  - Pour Einstein la lumière est corpusculaire : les particules de lumière cèdent leur énergie aux électrons au moment de la rencontre et s'annihilent (l'énergie des électrons arrachés =  $E = hf - \text{énergie de liaison}$ )



# IER CONGRÈS SOLVAY 1911 : RAYONNEMENT ET QUANTAS

---



# 1916 : EXPÉRIENCE DE MILLIKAN

---

Millikan mesure très précisément les énergies des électrons émis par effet photoélectrique et retrouve les prévisions d'Einstein → le quanta de lumière est officiellement appelé „photon“ en 1923

# 1913 : L'ATOME DE BOHR

---

- Les électrons se déplacent sur des niveaux bien déterminés qui correspondent à des états stationnaires. Absorption : on monte ; émission : on descend.
- Échelle macroscopique et basse fréquence : description elm
- Échelle nanoscopique et haute fréquence : photons
- DUALITE ONDE CORPUSCULE : La lumière est à la fois onde et corpuscule.
- 1925 Thomson → image „le tigre et le requin“

# 1924 : LA DUALITÉ ONDE CORPUSCULE

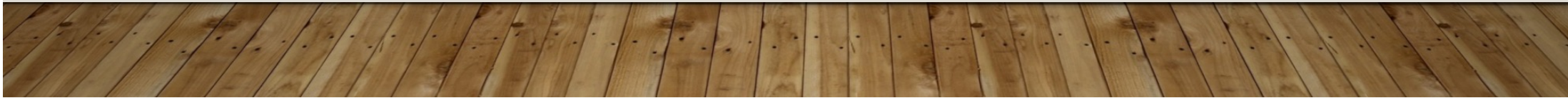
---

- Particule :  $E, p$
- Onde : nbre d'onde  $k, f$
- Liens :  $E = hf$  et  $p = hk$
- Chaque particule est associée à un champ scalaire dont l'extension est d'autant plus grande que la masse de la particule est faible.

# POUR PROLONGER...

---

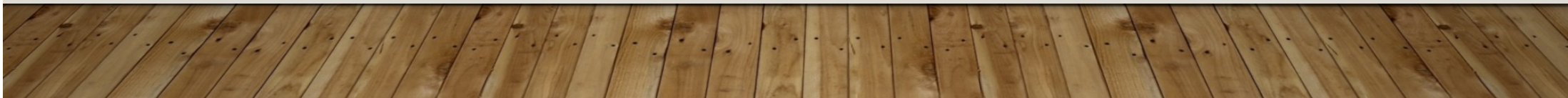
- <https://www.radiofrance.fr/franceculture/les-theories-de-la-lumiere-6046054>



# CONCLUSION

---

- Décrypter la lumière qui permet de voir sans être vue
- Objet complexe de la physique
- Qui intervient à de multiples niveaux de notre vie de tous les jours
- Qui permet de sonder l'infiniment loin et l'infiniment petit

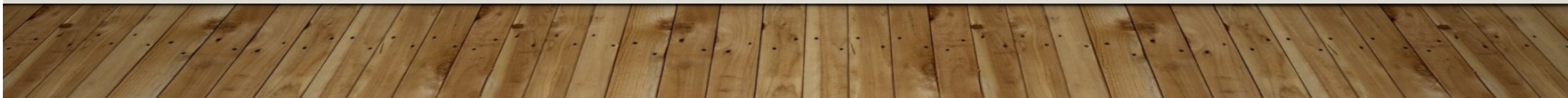




# CARACTÉRISTIQUES DU SAVOIR SCIENTIFIQUE (GUILLAUME LECOINTRE)

---

- **Scepticisme** (le scientifique accepte de se laisser surprendre par un résultat d'expérience inattendu, réfutabilité possible par la communauté scientifique)
- **Réalisme** (le monde existe indépendamment de la perception que j'en ai, et antérieurement à mes descriptions)
- **Universalisme** (je veux décrire la totalité du monde)
- **Rationalité** : lien logique entre les faits (cohérence)
- **Parcimonie** (décrire un maximum de choses avec un minimum d'énoncés)
- **Matérialisme méthodologique** (descriptions sans formes immatérielles ou surnaturelles)
- **Transparence des procédures** (méthodes scientifiques claires, reproductibilité, autonomie du savoir produit vis à vis de toute autorité, production collective et amoral, donc objective)
- **Prise en compte de toutes les données** en lien avec le sujet traité



- 
- « une théorie scientifique est une œuvre collective en continuel chantier » B. Maitte, 2014.



# LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE...

---



# INTERETS DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

---

- Lutte contre les fake news (preuve expérimentale/historique)
- Homo sapiens : touchant, inventif
- Compréhension de la science

