“ Sur la possibilité de détecter un différentiel ou perte de matière (ou masse) par un signal électromagnétique de surface résonant : vers le concept de balance photonique? ”

Bruno Bêche, Cyril Le-Corre, Valérie Mesnet

▶ **To cite this version:**

Bruno Bêche, Cyril Le-Corre, Valérie Mesnet. “ Sur la possibilité de détecter un différentiel ou perte de matière (ou masse) par un signal électromagnétique de surface résonant : vers le concept de balance photonique? ”. Cordée de la Réussite PASS : ”Pour une ambition Scolaire Scientifique”, Lycée Fulgence Bienvenüe (programme étatique), May 2021, Loudéac, France. hal-03247124

HAL Id: hal-03247124
https://hal.science/hal-03247124

Submitted on 7 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cordée Réussite PASS mai 2021, Lycée Fulgence Bienvenüe à Loudéac

Pour une Ambition Scolaire Scientifique

Bruno Bêche (Pr. IETR CNRS - UR1)
avec Cyril Le-Corre, Valérie Mesnet
et l'ensemble des enseignant.e.s de Sciences du :

https://www.ietr.fr/bruno-beche

Lycée Fulgence Bienvenüe à Loudéac (Angélique Simoneau Le Sager)
Collège Louis Guilloux de Plemet
Collège Paul Eluard de Mûr de Bretagne-Guerlédan
Collège Romain Rolland de Pontivy

« Sur la possibilité de détecter un différentiel ou perte de matière (ou masse) par un signal électromagnétique de surface résonant : vers le concept de balance photonique? »

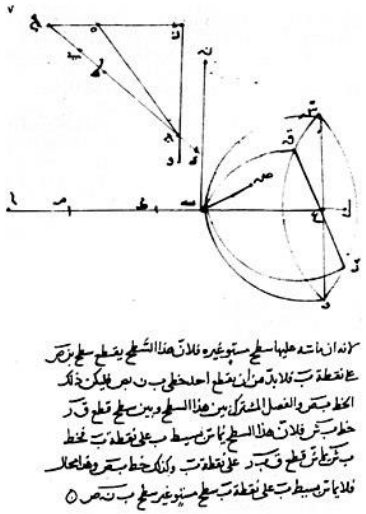
VP - Orientation et Insertion Professionnelle, Cécile Lecomte

UnivRennes1
univ-rennes1.fr

La Lumière en ‘rayon’ : Géométrie

Ibn
Sahl

An 984 (Mathématicien, Bagdad)
***1ère mention* des lois de la réfraction de la lumière**

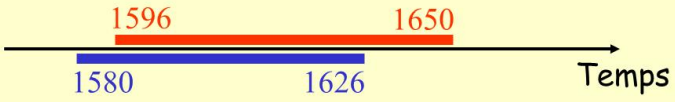


Willebrord
Snell

Astronome, Mathématicien hollandais

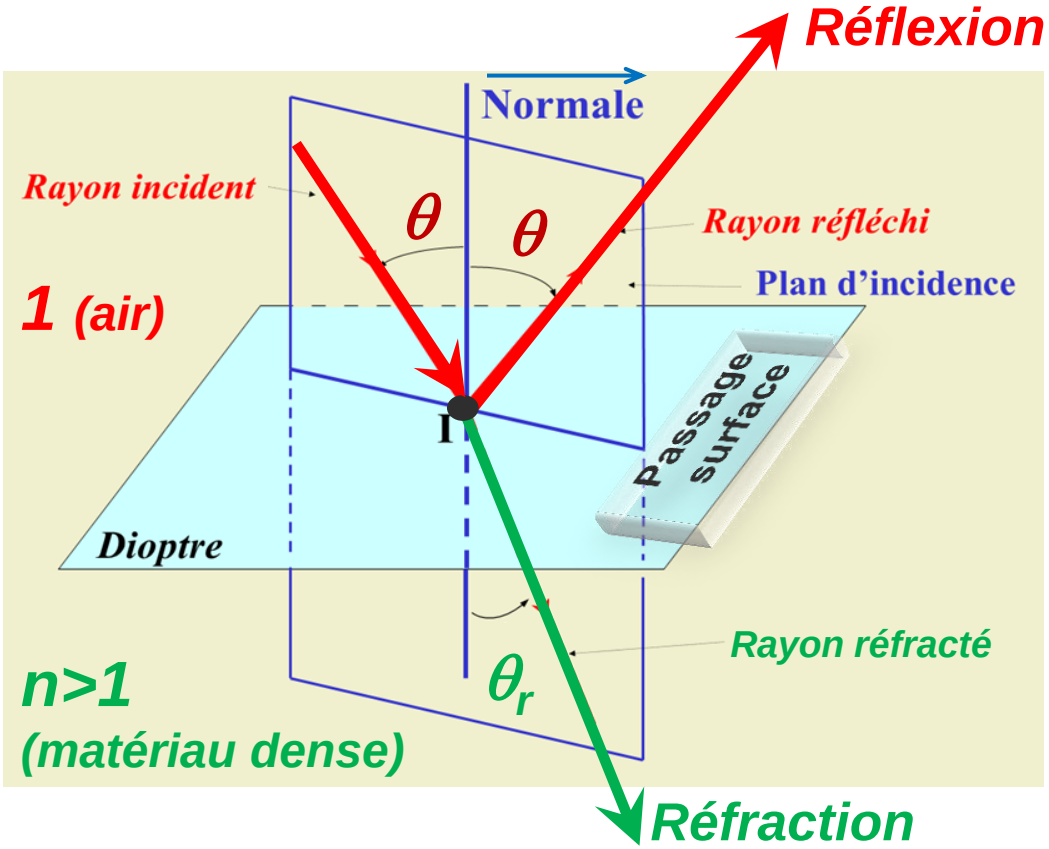
René
Descartes

Philosophe, Mathématicien, Physicien français



La Lumière en ‘rayon’ : Géométrie

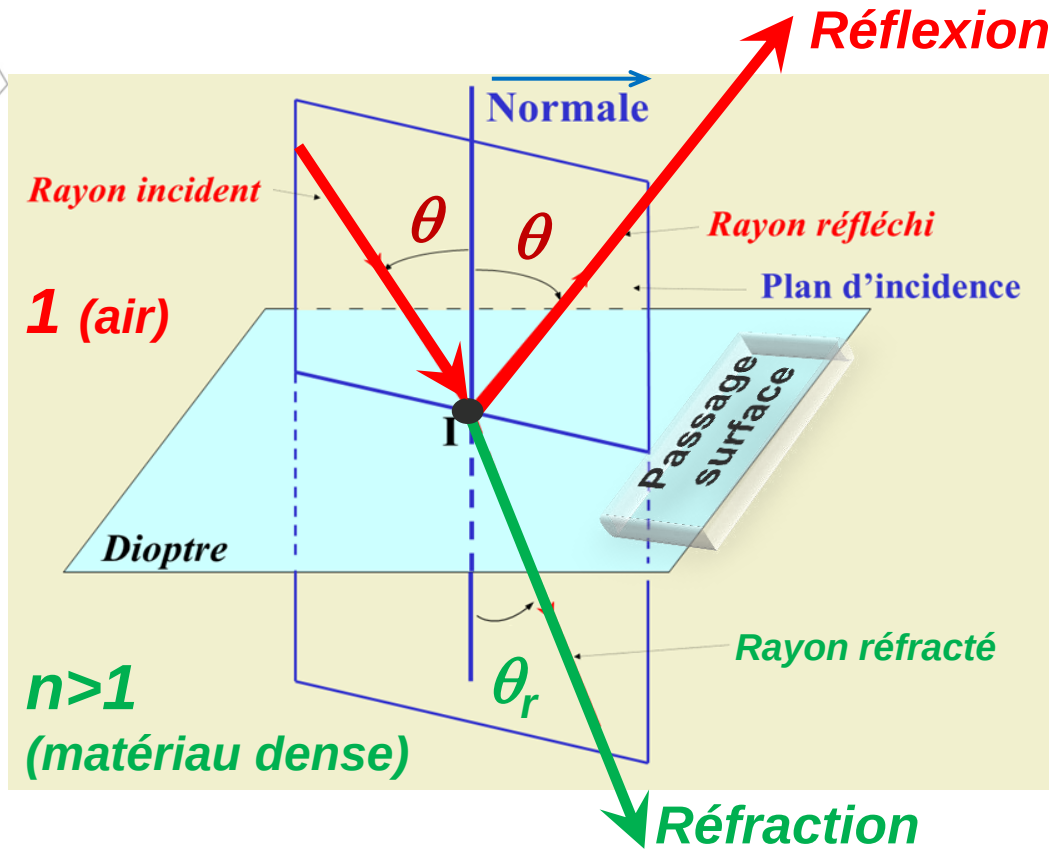
(trigonométrie)

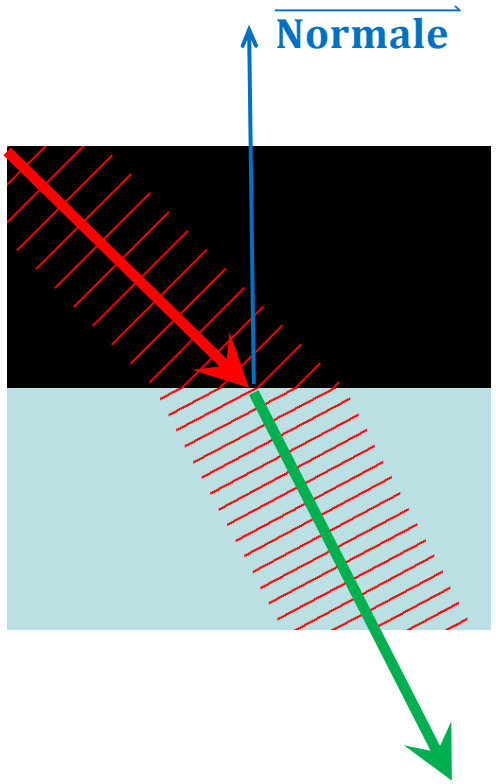


La lumière se rapproche de la Normale lors du passage dans *n* (>1) ; elle se *confine* dans le matériau d’indice *n* le plus fort ; **les matériaux d’indices *n* élevés peuvent *piéger* la lumière par Réflexion Totale (RT).**

Le principe du *retour inverse de la lumière* s’applique *(temps ‘inversé’)*

La Lumière en ‘rayon’ : Géométrie

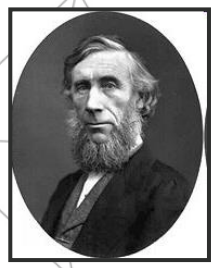




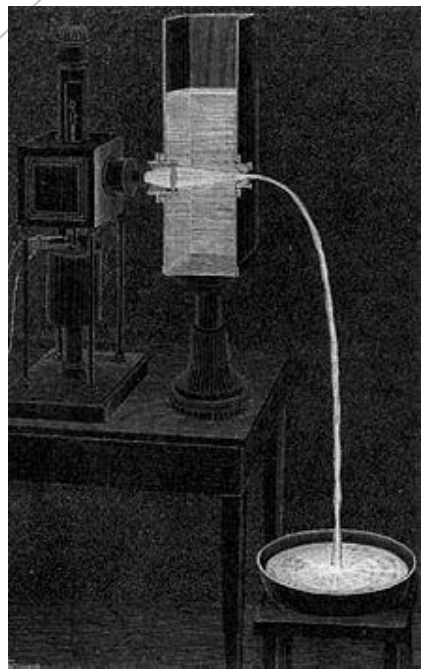
Onde réfractée : le changement de direction = un changement de vitesse

Si *n* > 1 (milieu plus réfringent que l’air) la célérité de la lumière sera divisée par *n*

La Lumière ‘piégée’: Guidage par Réflexion Totale



John Tyndall (Irlandais, 1820-1893): 1ère démonstration scientifique du principe de la Réflexion Totale (RT) interne devant la Société Royale Britannique.



La première démonstration scientifique du principe de la RT fut faite par le physicien Irlandais John Tyndal devant la Société Royale britannique en *1854*. À l´époque, l'idée de courber la trajectoire de la lumière, de quelque façon que ce soit, *était révolutionnaire puisque les scientifiques considéraient que la lumière voyageait uniquement en ligne droite*. Sa démonstration consistait à guider la lumière dans un jet d’eau déversé d'un trou à la base d'un réservoir. En injectant de la lumière dans ce jet, celle-ci suivait bien la courbure du jet d'eau, démontrant ainsi qu'elle pouvait être déviée de sa trajectoire rectiligne. Il put de cette manière démontrer le principe qui sera ensuite à la base des guides d’ondes plus d’une centaine d’années plus tard (fibres optiques)...

Fontaine de Lumière ou « guider la lumière » par un jet d'eau d'indice plus élevé que l'air (Indices optiques : fluide eau n_{eau}=1,33 en lumière visible et n_{air}=1).

La Lumière ‘piégée’: Guidage par Réflexion Totale

- **Années 70, S.E. Miller**
  ‘Naissance de l’optique/photonique intégrée’
  Début des puces intégrées pour travailler avec la lumière (*émettre/transmettre/détecter*)

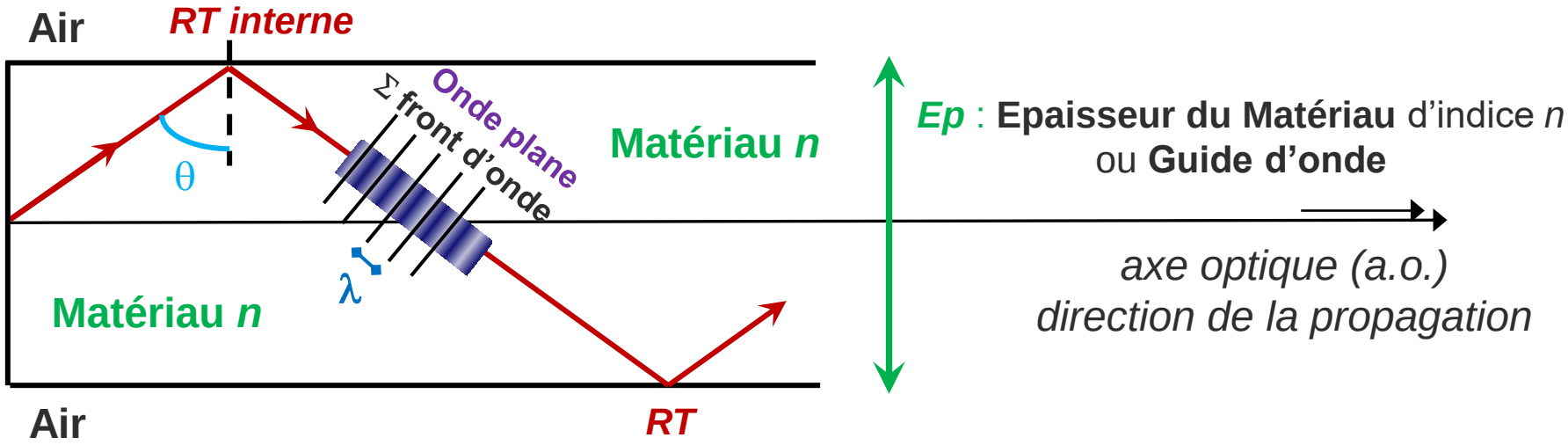
THE BELL SYSTEM
TECHNICAL JOURNAL
DEVOTED TO THE SCIENTIFIC AND ENGINEERING ASPECTS OF ELECTRICAL COMMUNICATION
Volume 48 September 1969 Number 7
Copyright © 1969, American Telephone and Telegraph Company

Integrated Optics: An Introduction

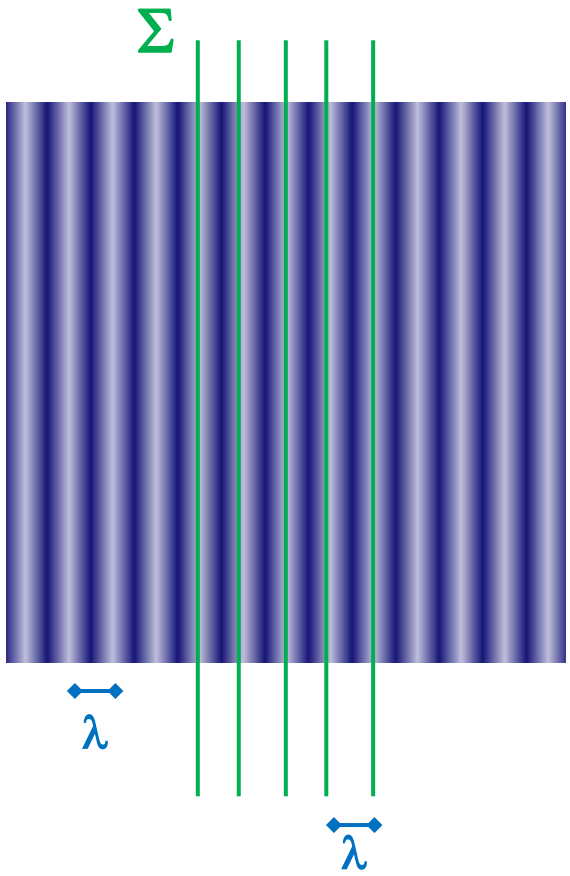
By STEWART E. MILLER
(Manuscript received January 29, 1969)

- **Schéma : propagation par RT successives (*ZIG/ZAG*)**

Couche plane de matériau (indice optique *n*) = ‘guide plan’



Le ‘modèle’ de l’Onde Plane

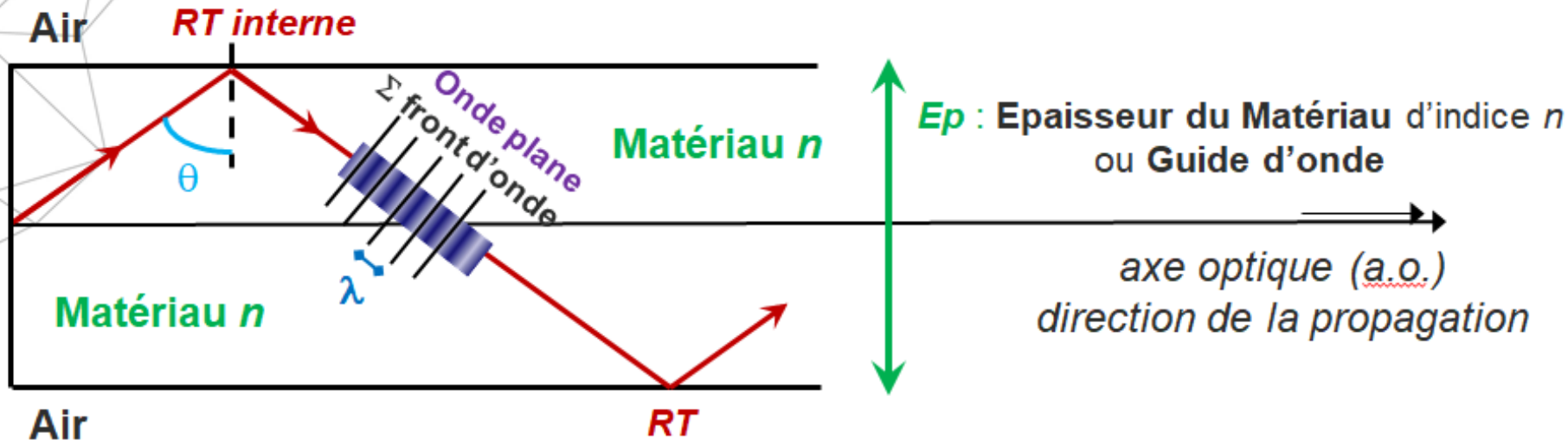


Onde plane, vague avec front d’onde Σ et longueur d’onde λ

La Lumière confinée et 'quantifiée' (I)

- **Schéma : propagation par RT successives (*ZIG/ZAG*)**

Couche plane de matériau (indice optique *n*) = 'guide plan'



Condition d'accord (de phase) et Apparition de la 1ère quantification (*m* un nombre entier) :

$$\cos\theta_{(m)} = \frac{m.\lambda}{2.E_p.n}$$

(simplification φ_r=0)

Uniquement certaines θ discrètes et bien identifiées permettent d'obtenir l'égalité ! Les paramètres opto- (λ, *n*) géométriques (E_p) fixent ces valeurs 'propres'. L'angle θ des relations de Snell-Descartes (réflexion) est l'équivalent d'un nombre quantifié du système !

La Lumière : Historique (XVII-XX^{èmes} Siècles)

Avant le XVII^{e}

Kepler 1610

Huygens 1678

Newton 1666

XVIII^{e}

Herschel 1800
IR

Ritter 1801
UV

~1600

Diffusion
Réflexion

Physique de…

L'onde et du Corpuscule

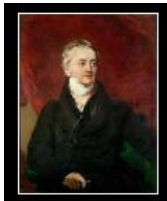
$$\lambda . f = c$$

$$h . f = E$$

Energie

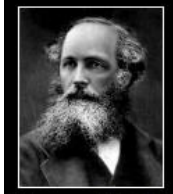
fréquence

célérité



Young 1801
Ondes

Fresnel 1815
Opt. Ondul.



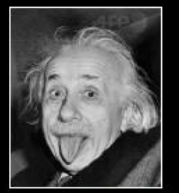
Maxwell 1861
Ondes EM

Hertz 1887
Radio ; PE

Röntgen 1895
RX

Laue 1912
Diffraction

Planck 1900



Einstein 1905

~1800

Réflexion
Transmission
Diffraction
Interférence

~1900

Corpuscule
Photon

Histoire de l'Electromagnétisme

OPTIQUE

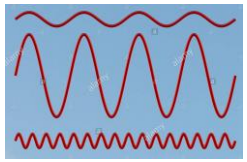
1637 : Dioptrique de Descartes
1665 : Grimaldi observe la diffraction
1666 : Roemer découvre que la lumière a une vitesse finie
1672 : Newton décompose la lumière blanche
1679 : Principe de Fermat
1690 : Théorie ondulatoire de la lumière par Huygens
1704 : Traité d'optique de Newton (théorie corpusculaire)
1800 : Malus trouve la polarisation par réflexion
1803 : Young effectue les premières expériences de diffraction
1814 : Fresnel développe la théorie ondulatoire de la lumière (diffraction et interférences)
1819 : Arago et Fresnel prouve la nature transverse de la lumière
1829 : Fizeau mesure la vitesse de la lumière
1846 : Faraday montre l'effet d'un champ magnétique sur la lumière

ELECTRICITE ET MAGNETISME

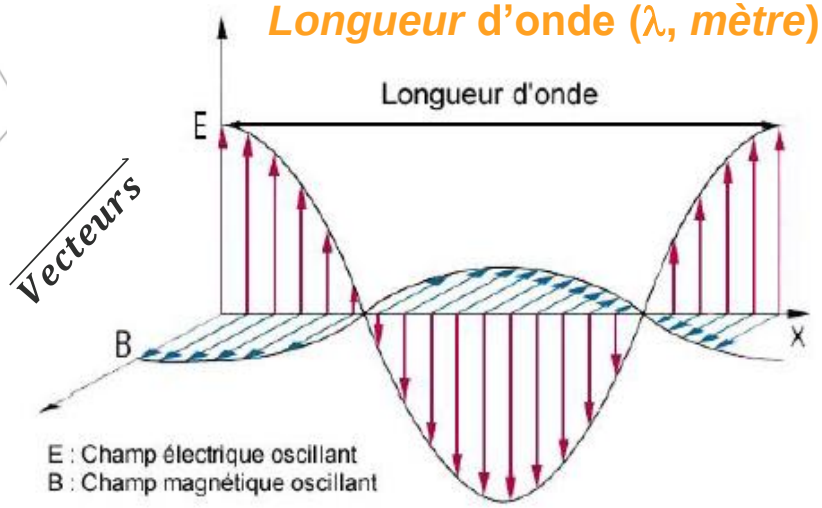
1731 : Gray : différence entre conducteurs et isolants
1746 : Van Musshen Brock invente la bouteille de Leyde
1750 : Francklin : deux types de charges
1785 : Loi de Coulomb
1800 : Volta invente la pile et Nicholson électrolyse l'eau
1820 : Oersted crée un champ magnétique par un courant
Arago magnétise du fer et de l'acier
Loi de Biot et Savart
Ampère étudie la force entre deux courants
1826 : Loi d'Ohm
1831 : Etude du magnétisme terrestre par Gauss et Weber
Faraday découvre l'induction
1834 : Loi de Lenz pour l'induction
Loi de Faraday pour l'électrolyse
1835 : Henry et Faraday découvrent la self-induction
1838 : Faraday découvre le condensateur
1841 : Gauss effectue des mesures électriques et magnétiques dans les mêmes unités
1842 : Henry étudie les circuits oscillants
1865 : Mawxell propose les lois de 'l'électromagnétisme'
1887-1893 : Hertz découvre les ondes radioélectriques qui confirment expérimentalement les équations de Maxwell
1887 : Expérience de Michelson
1905 : Einstein crée la relativité restreinte qui unifie la mécanique et l'électromagnétisme
1949 : Feymann, Schwinger … unifient la mécanique quantique et l'électromagnétisme, c'est l'électrodynamique quantique

Lecture… et détails

La Lumière en tant qu'Onde

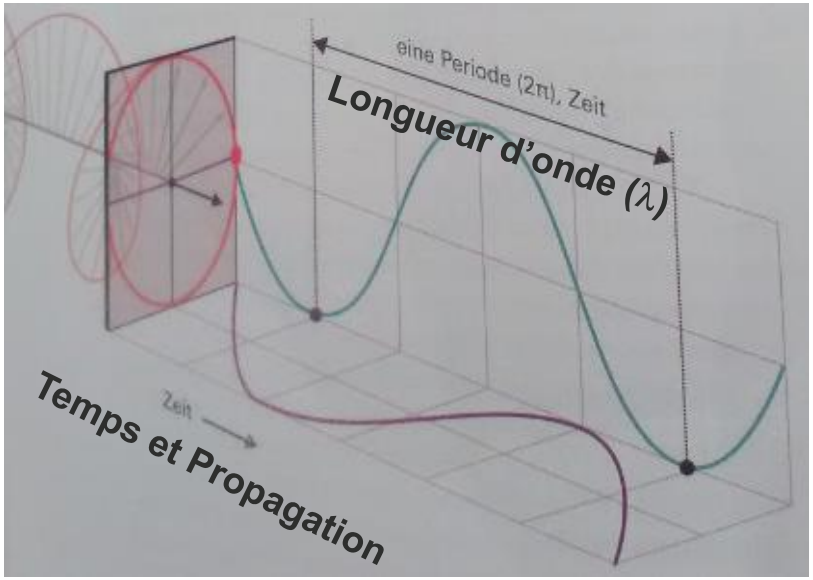


Longueur d'onde (λ, *mètre*)



1 µm = 1.10^{-6} m = 0,000001 m
µ = 'micro'

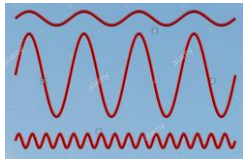
$\overrightarrow{Direction}$ de Propagation

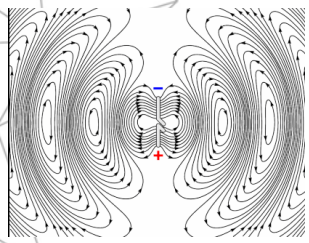


- Sinusoïdes ou 'ondulations/oscilations' (*cos*, *sin*)
- Electromagnétisme (et donc la lumière)

  Ondes de *portées* 'infinies' → ∞

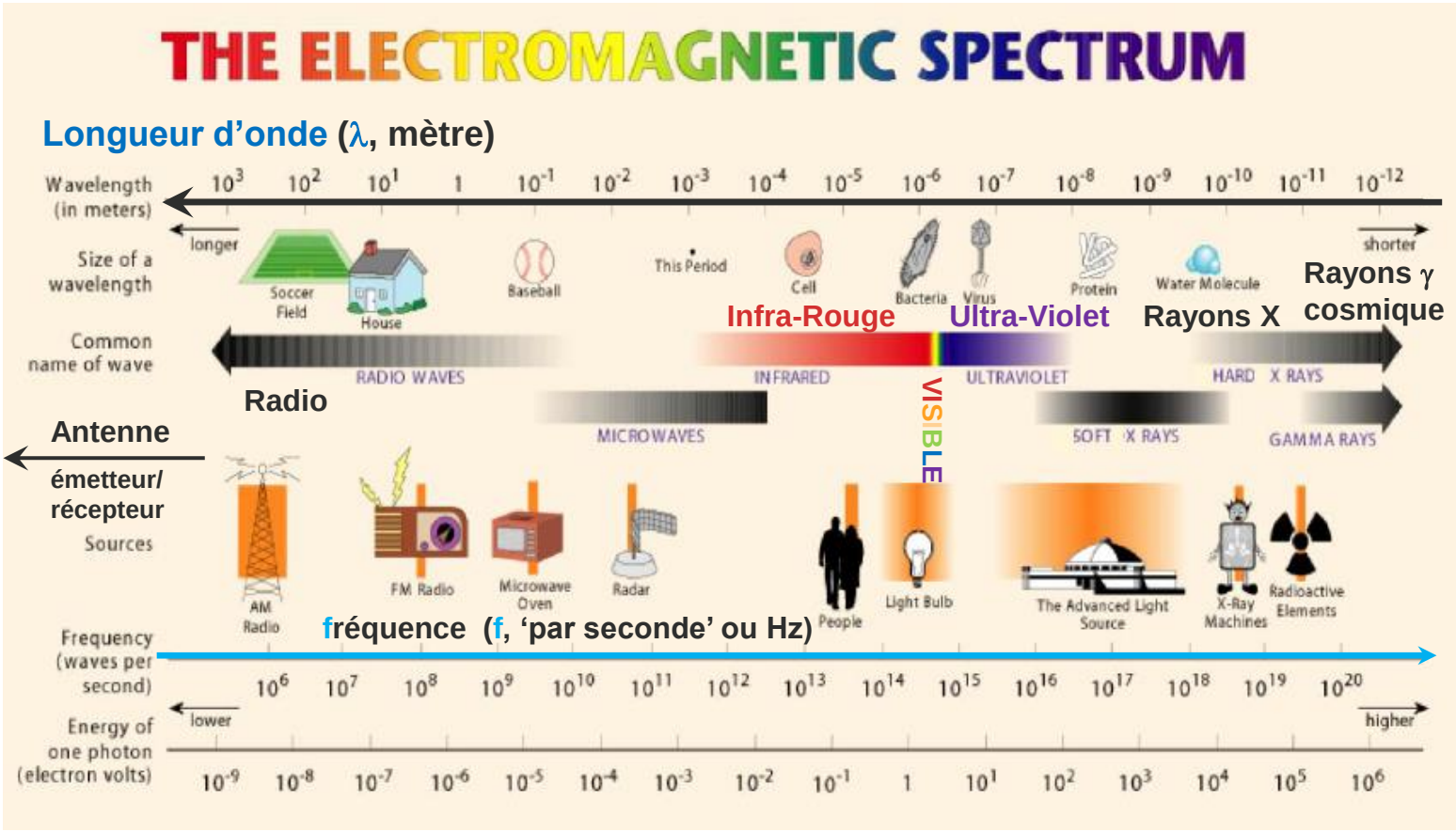
La Lumière en tant qu'Onde
(onde électromagnétique)





Antenne

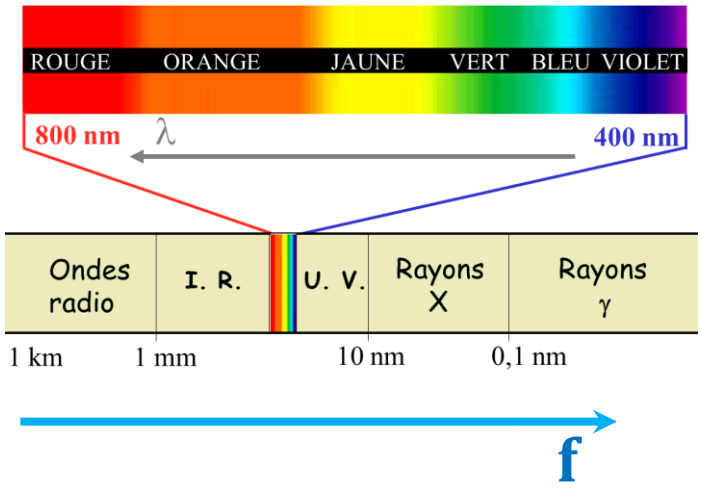
émetteur/
récepteur



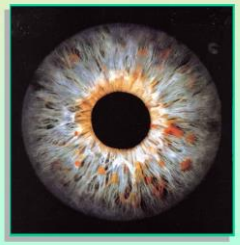
$$\lambda . f = c$$

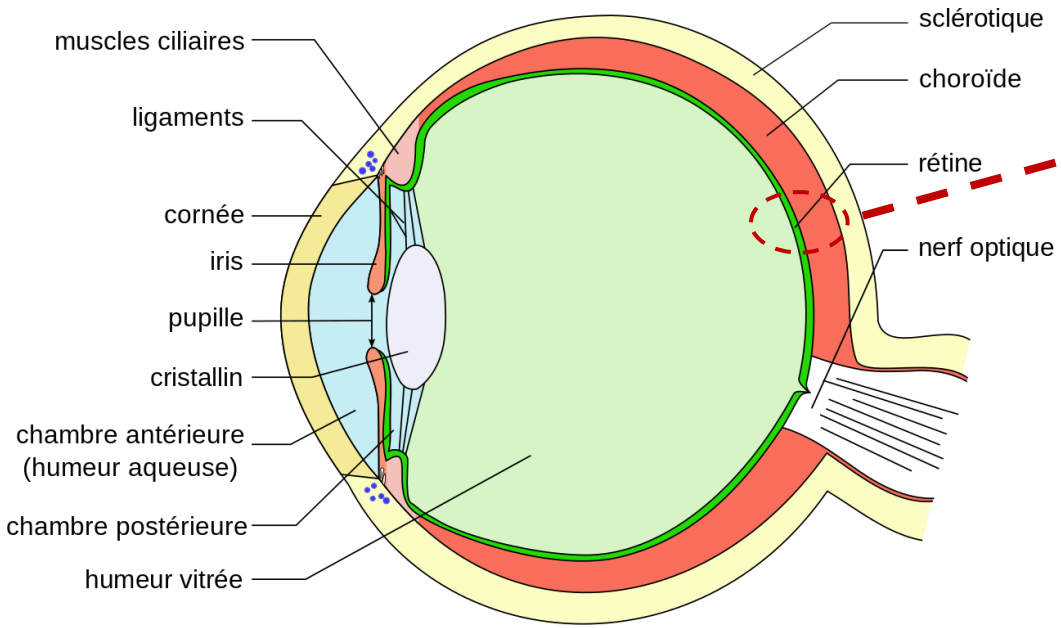
c scalaire, 'célérité de la lumière' (m/s) 'Terre ➔ Lune' en ~1 seconde (299 792 458 m/s)

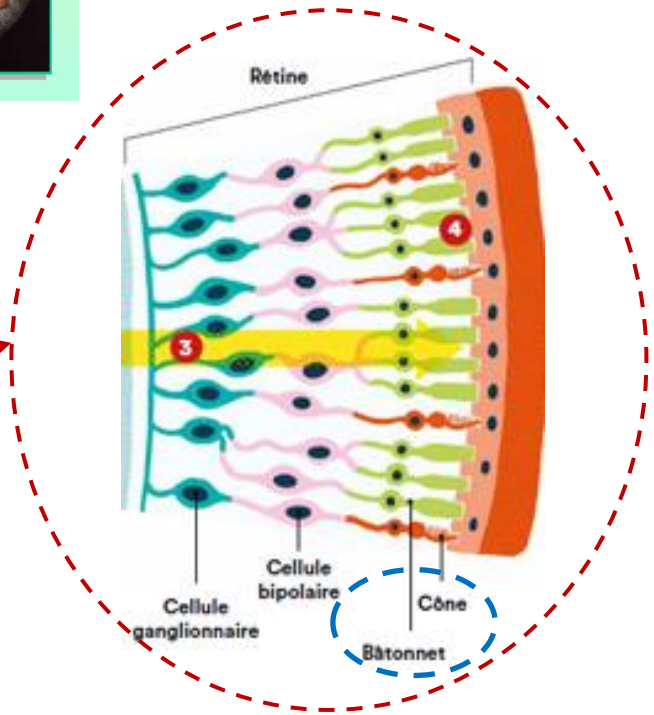
Le visible et la détection : *un exemple*



Un détecteur : l'oeil







Cellules réceptrices
Bâtonnets (vision nuit, nocturne, scotopique)
Cônes (vision jour, diurne, photopique)

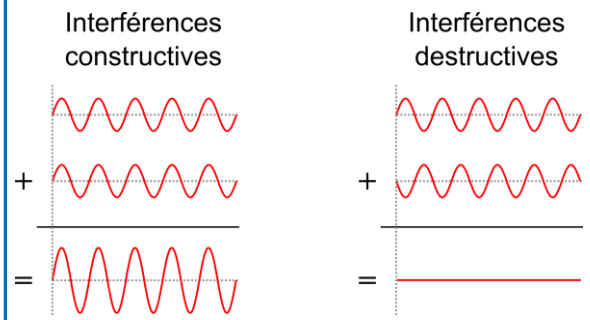
La Lumière en tant qu'Onde (interférences)

(onde électromagnétique)

Voir fin du lycée/supérieur
Algèbre des nombres 'complexes'
$\mathbb{C} = \mathbb{R} + i\,\Im$

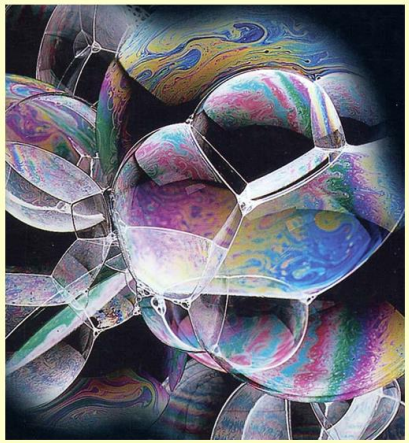
Notion de *déphasage* φ en physique

Exemples : deux cas particuliers



Nature ondulatoire de la lumière

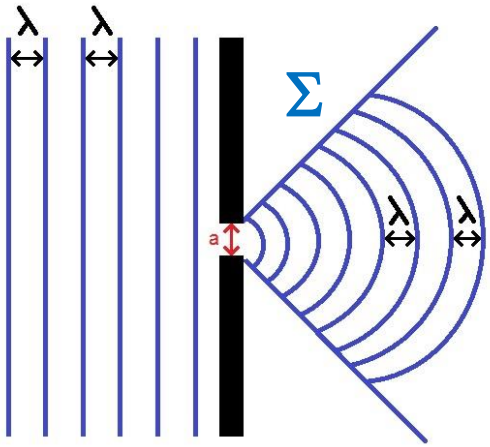
Interférences



Les couleurs des bulles de savon peuvent être interprétées en considérant la lumière comme une ONDE

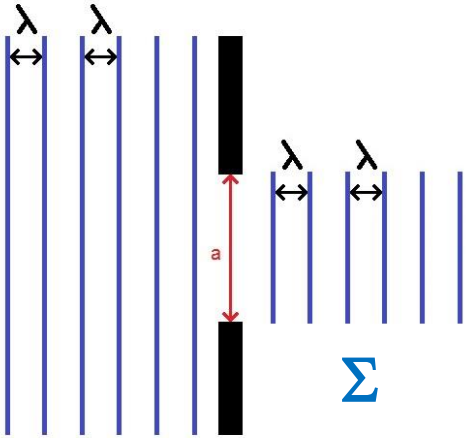
'Construction/Destruction' Processus de couleurs

La Lumière en tant qu'Onde (diffraction)



Le front d'onde Σ se déforme suite à la diffraction par une pupille (ou trou…)

Nature ondulatoire et oscillante



Le front d'onde ne se déforme pas par passage au travers d'une grande ouverture

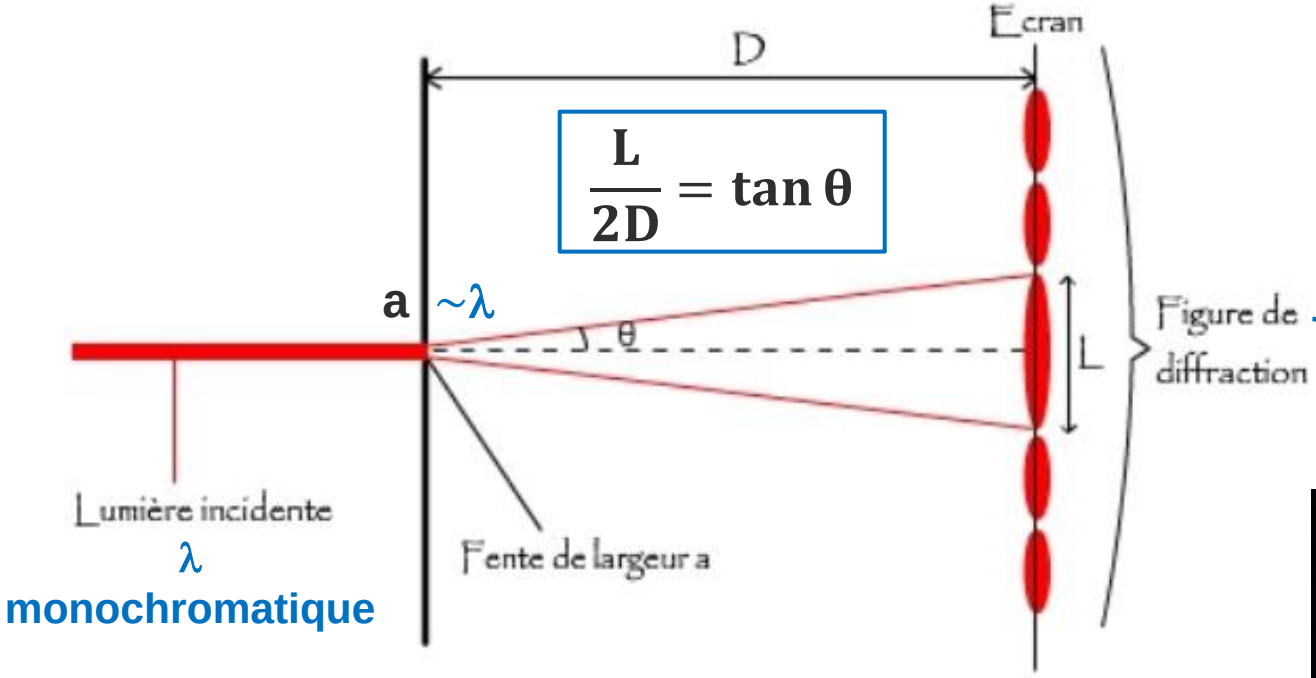
Nature géométrie rayons droits

La Lumière en tant qu'Onde (diffraction)

(onde électromagnétique)

Diffraction au travers une *pupille* d'une onde de longueur d'onde λ fixée

La lumière (onde) prendra *spatialement* une autre *forme* (malléable) autre que le rayon incident 'droit'. Cette forme dépendra de la nature de la pupille, fente, trou … traversé.

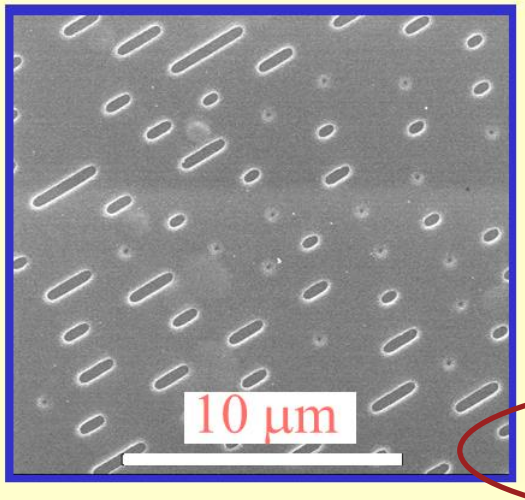


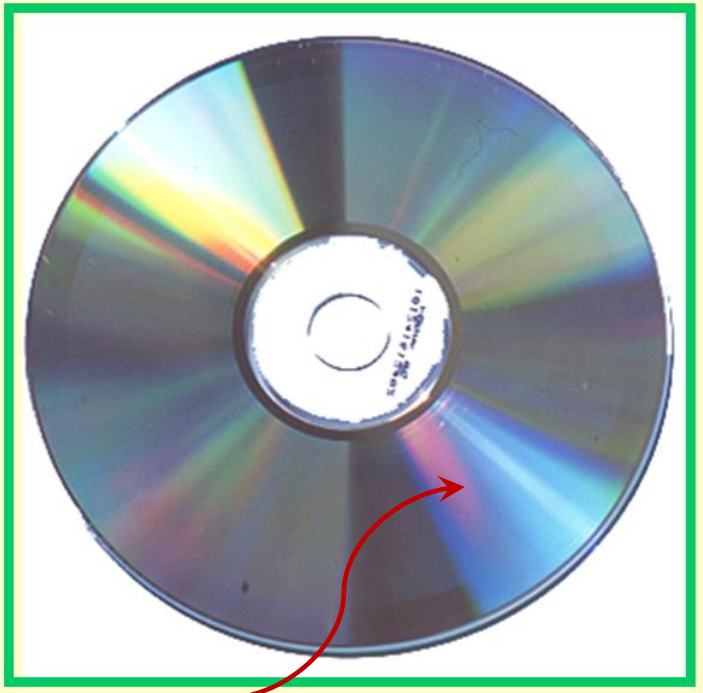
Multi–λ
polychromatique

La Lumière en tant qu'Onde (diffraction)

(onde électromagnétique)

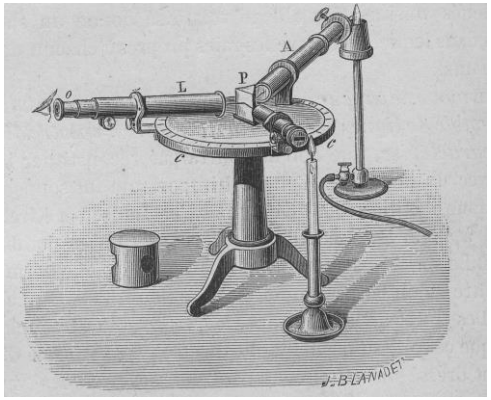
Diffraction de la lumière
par les " PETITS "
creux gravés sur un CD

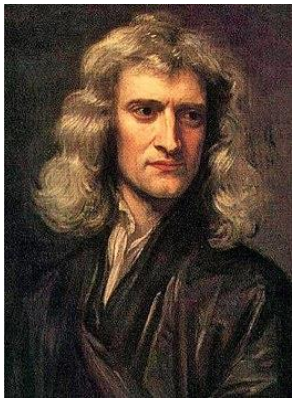




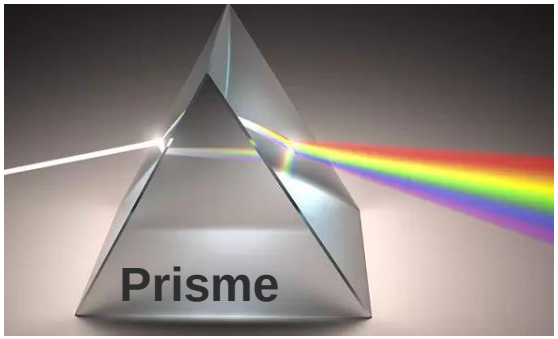
Déviation (diffraction) différente
suivant la couleur

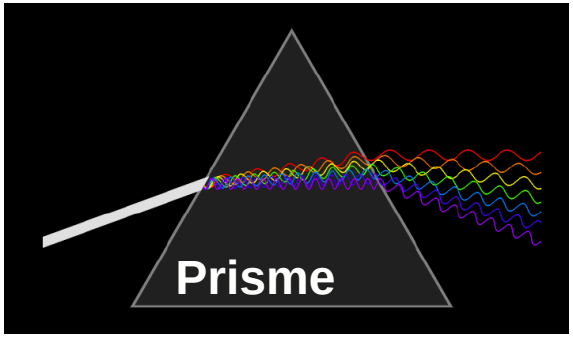
La lumière ‘décomposée’ : propriétés et constitution





Newton (1666)





violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge

L'indice de réfraction *n* du matériau varie avec la longueur d'onde λ (ou la fréquence *f*) de la lumière qui l'éclaire : *n*(λ) *ou n(f)*

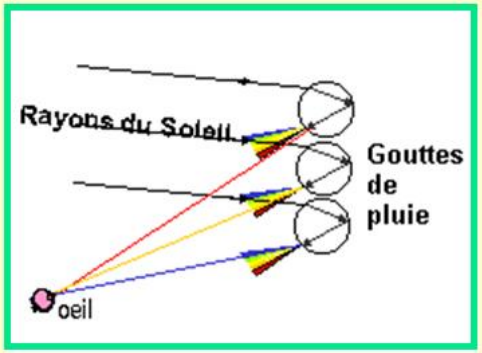
{ Ce phénomène, important en Optique, est appelé *dispersion* }

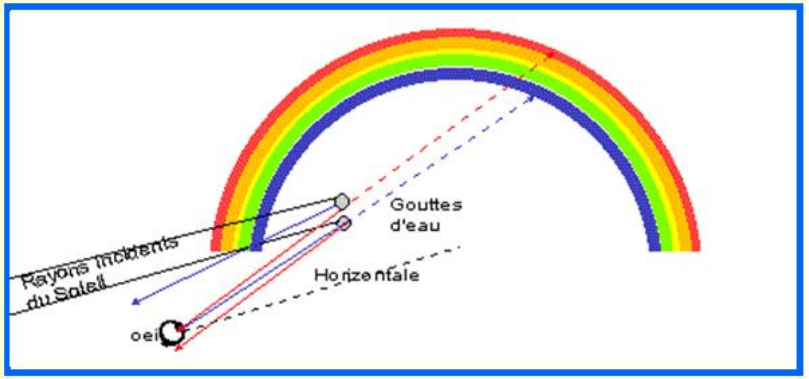
La lumière ‘décomposée’ : propriétés et constitution

Arc-en-ciel

- Déviation de la lumière par des gouttes d’eau

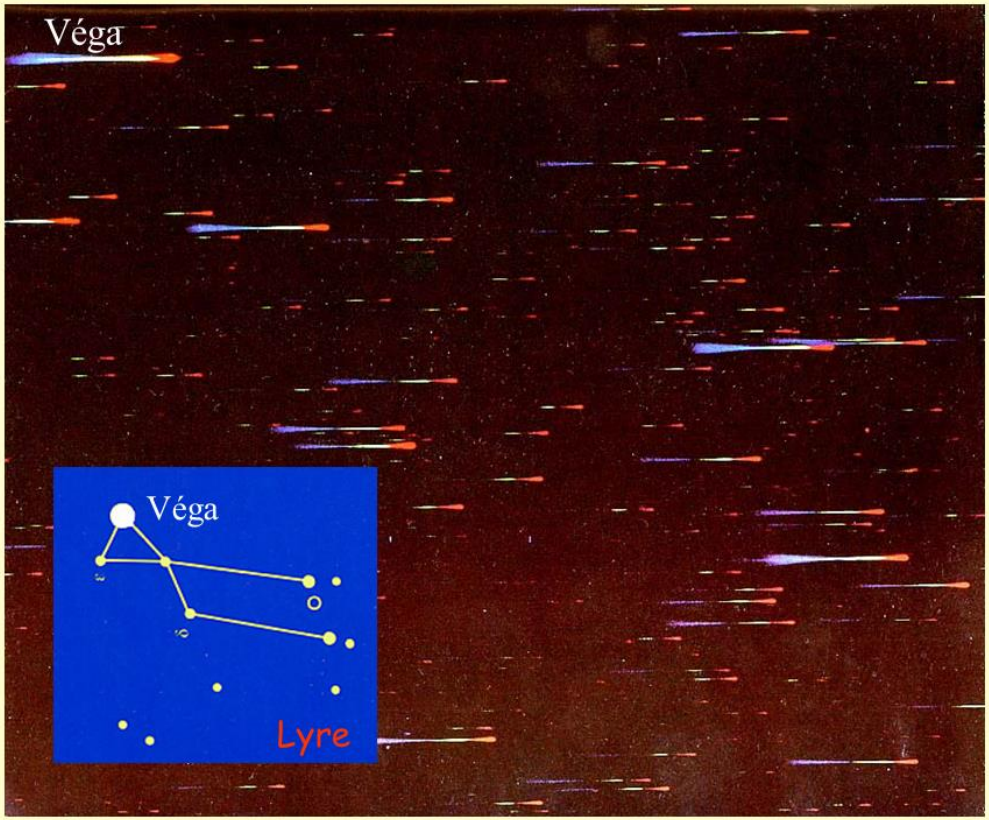
- L’indice n de l’eau dépend de λ→déviation différente suivant la couleur





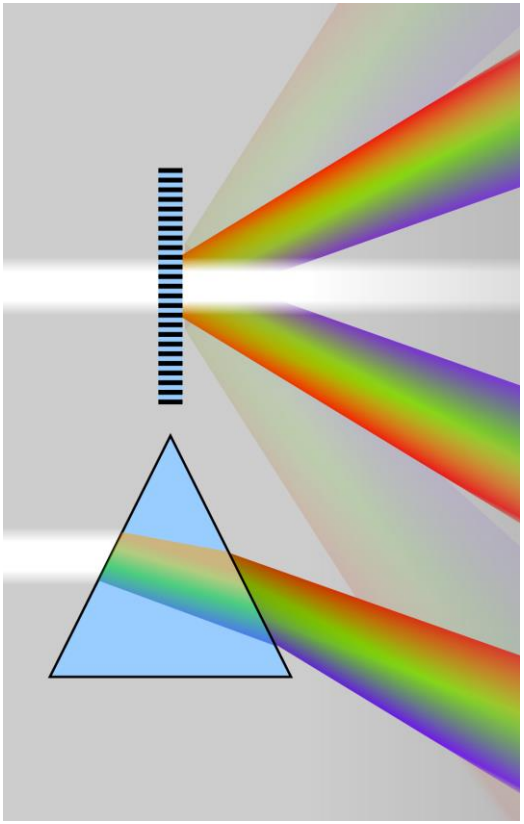
La lumière ‘décomposée’ : propriétés et constitution

Constellation de la Lyre vue à travers un prisme



Simple prisme =
Séparation des rayonnements par la dispersion ➔ Analyseur

La lumière ‘décomposée’ : Dispositifs Analyseurs

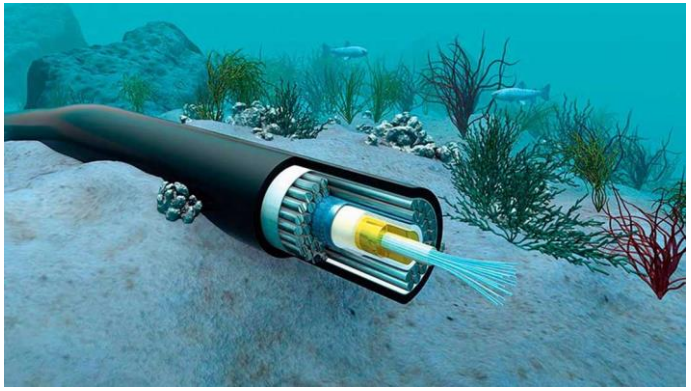


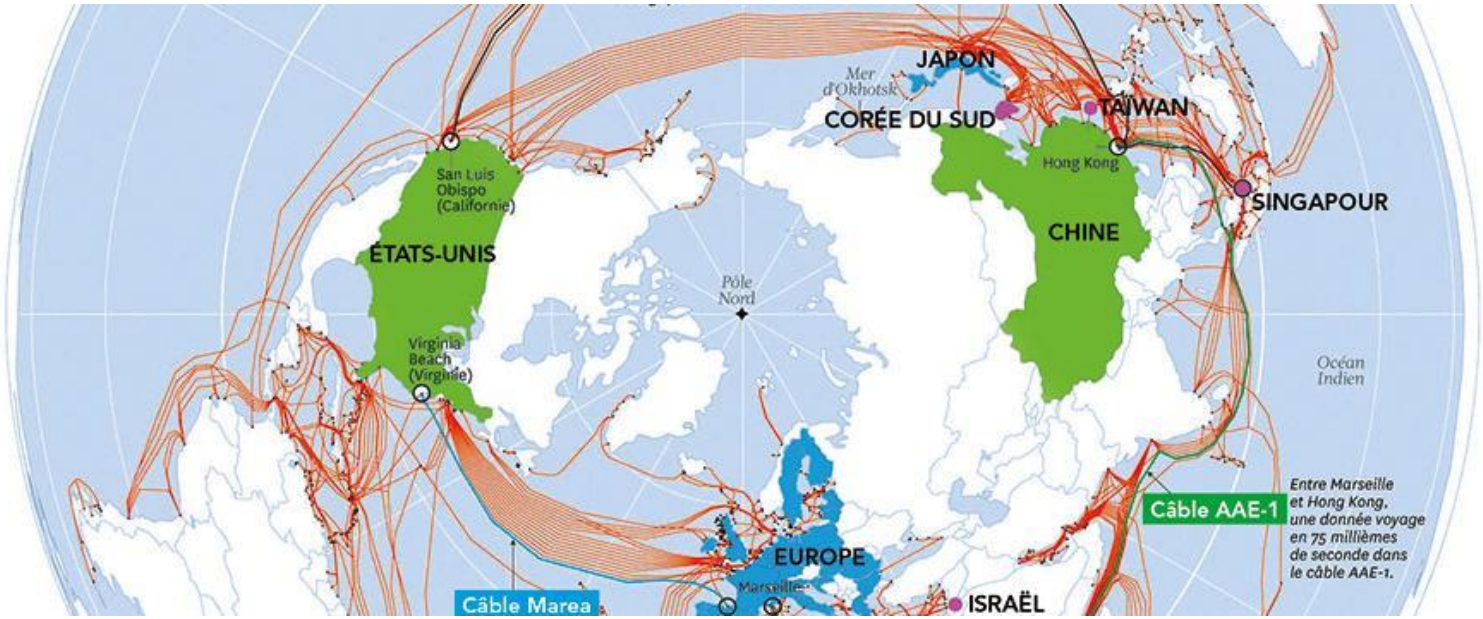
En conclusion : Les rayonnements

- Propagation en ligne droite
- Réflexion
- Réfraction $n(\lambda)$
- Processus de Diffraction et d’Interférométrie

Integrated light on chip : Integrated photonics

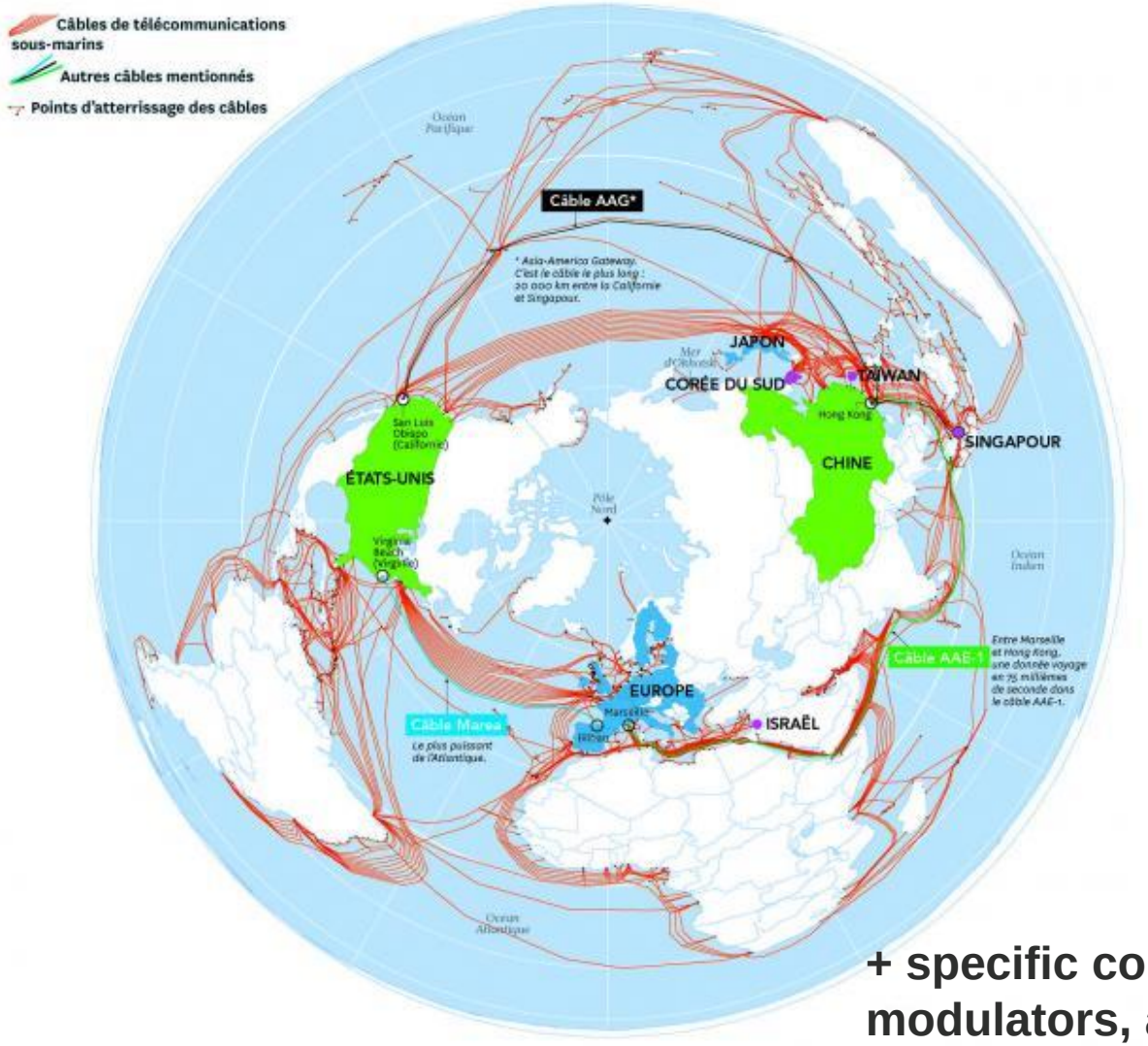
Optical fibers





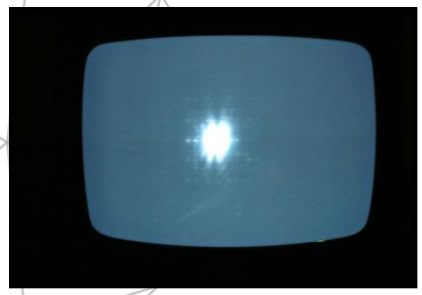
1,500,000 kilometers of cables laid on ocean floors (i.e.> 36 times around the Earth)

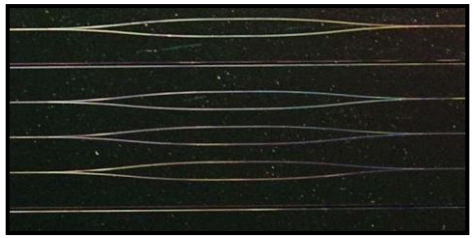
More than 99% of intercontinental voice, Internet and TV exchanges pass through !



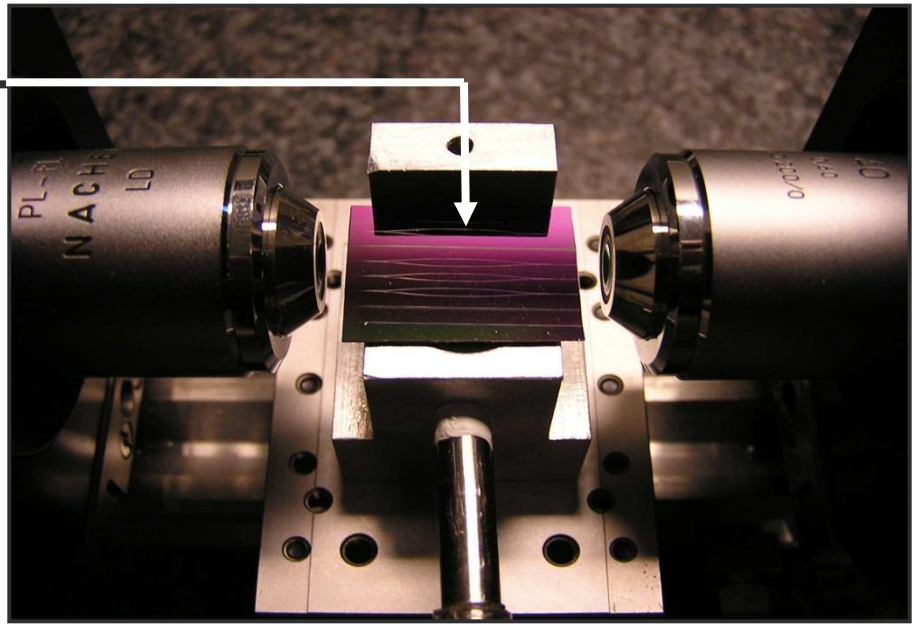
+ specific components, such as : modulators, amplifiers, filters…

Integrated light on chip : integrated photonics

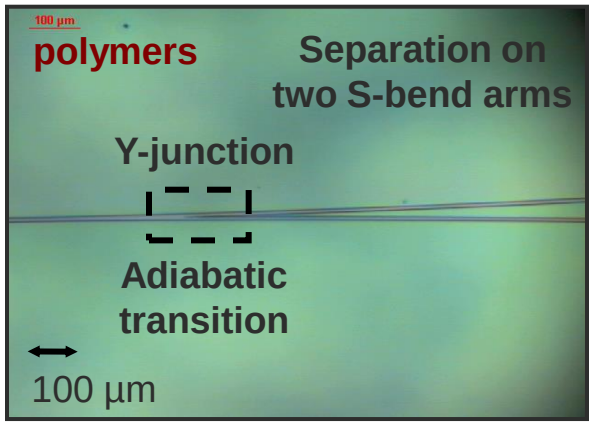


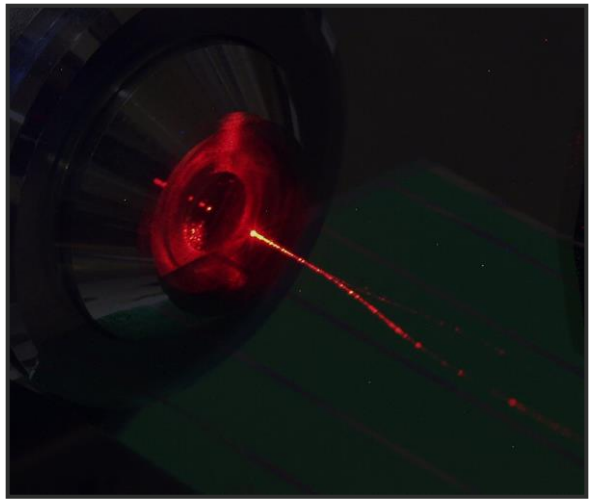


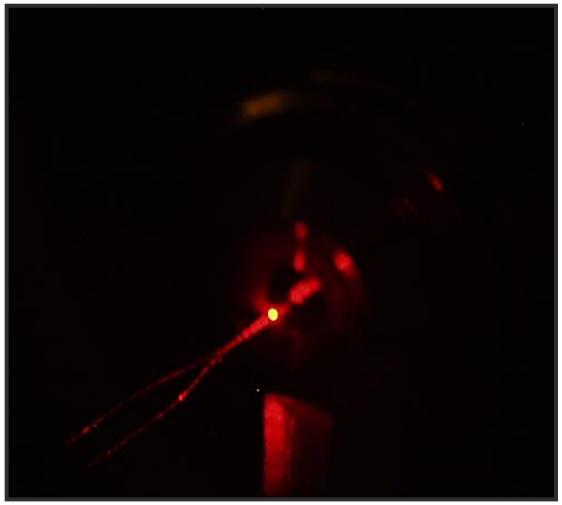
Upper view



Propagation single-mode
High optical confinement



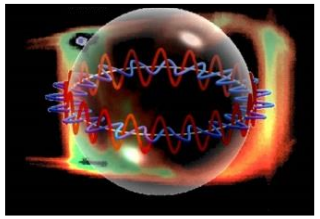


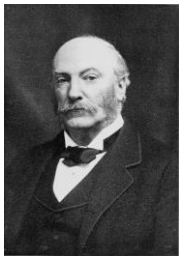


The resonant waves or Whispering Gallery Modes

Artist's view of the phenomenon

https://www.youtube.com/watch?v=XKRj-T4l-e8

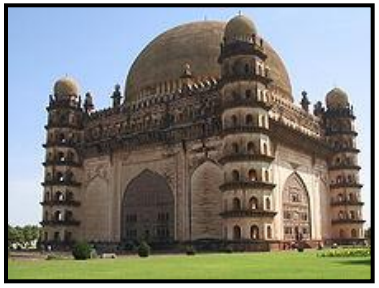




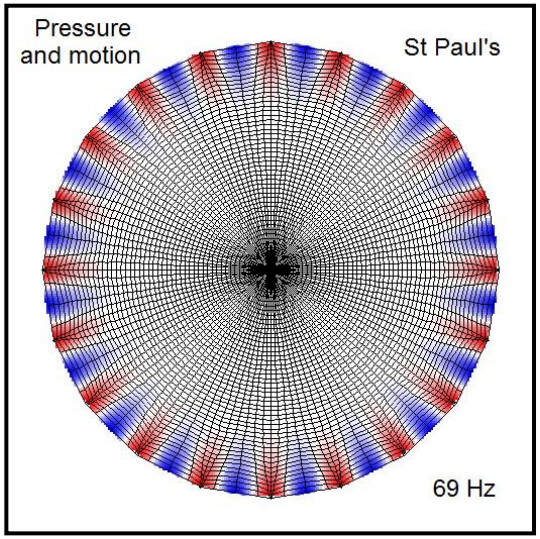
- **At the origin, discover in *acoustic* (Lord Rayleigh ➔theory in 1910-1914)**
- **Type of waves which can propagate along the concave surface (grazing reflection) + 'tuning' if cycle ! *Notion of resonance*.**

St Paul Cathedral - London – United Kingdom

Gol Gumbaz – Bijapur - India



Ex: Compression of the air - acoustic

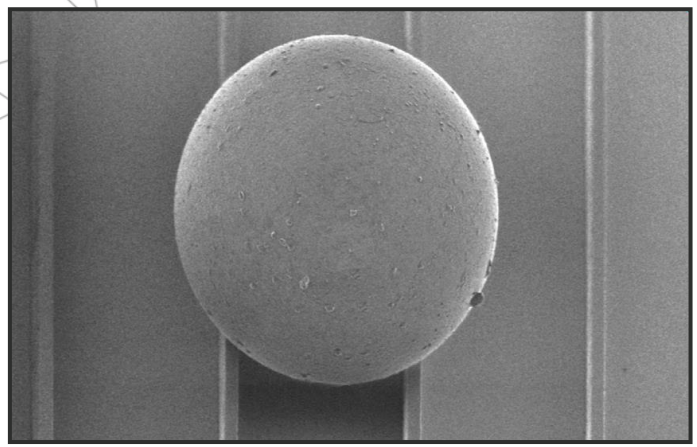


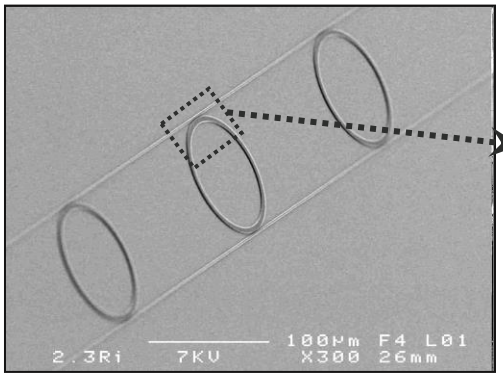
The resonant light waves or Whispering Gallery Modes

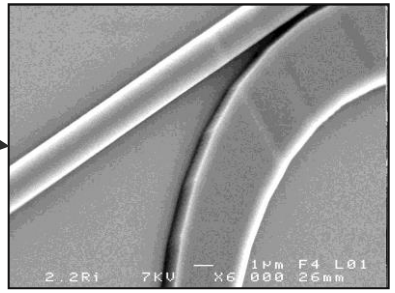
***One century later*, in *nano-sciences* and *nano-technologies*, such concepts are totally transposed to electromagnetic waves in integrated photonics.**

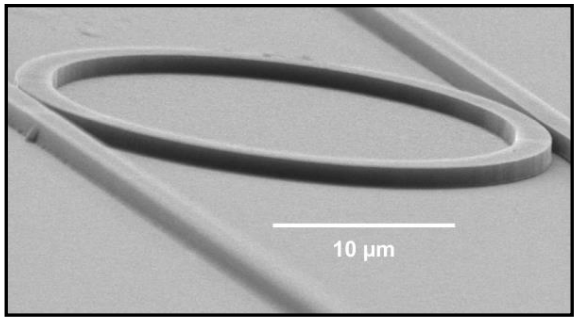
Existence of different processes so as to shape light channels or waveguides

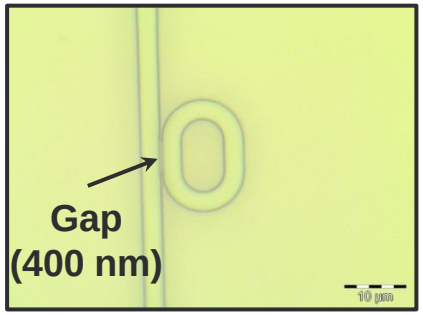
Various shapes :

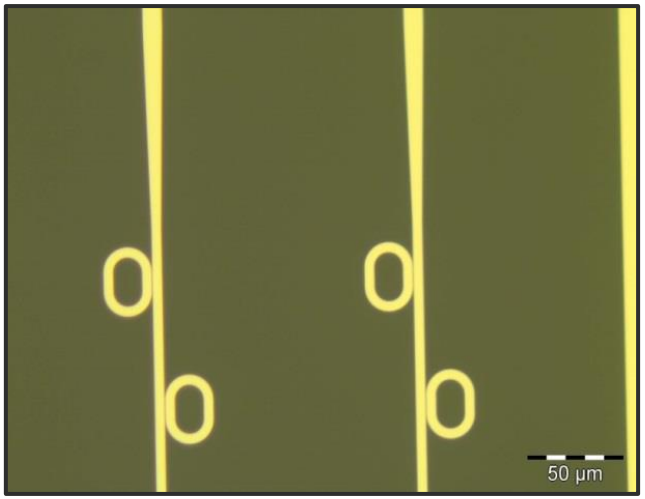










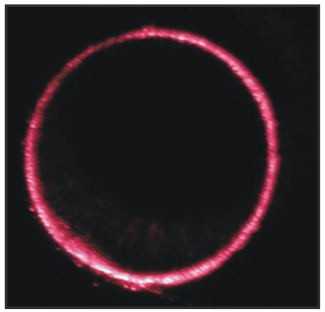


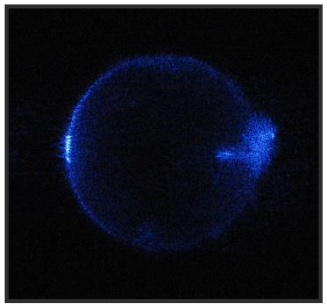
The resonant light waves or Whispering Gallery Modes

(= La Lumière piégée/guidée puis résonante et 'quantifiée' (II))

Optical Micro-Resonators = seductive objects for *re-cycling the light*

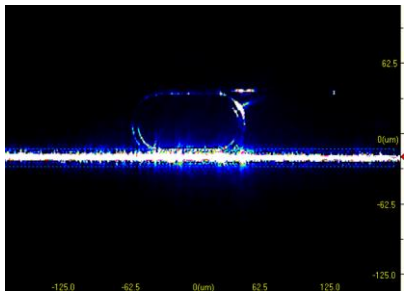
- Control of electromagnetic fields in term of ***spatial localization*** (or strong confinement of the light into a restrict V_{space} volume)
- ***Quantification of the optical modes*** and increase of their own life time τ into such cavities





Whispering gallery mode into a *disk* (λ=670 nm, red) and into a *sphere* (λ=450 nm, blue)

Whispering gallery mode into a *racetrack*



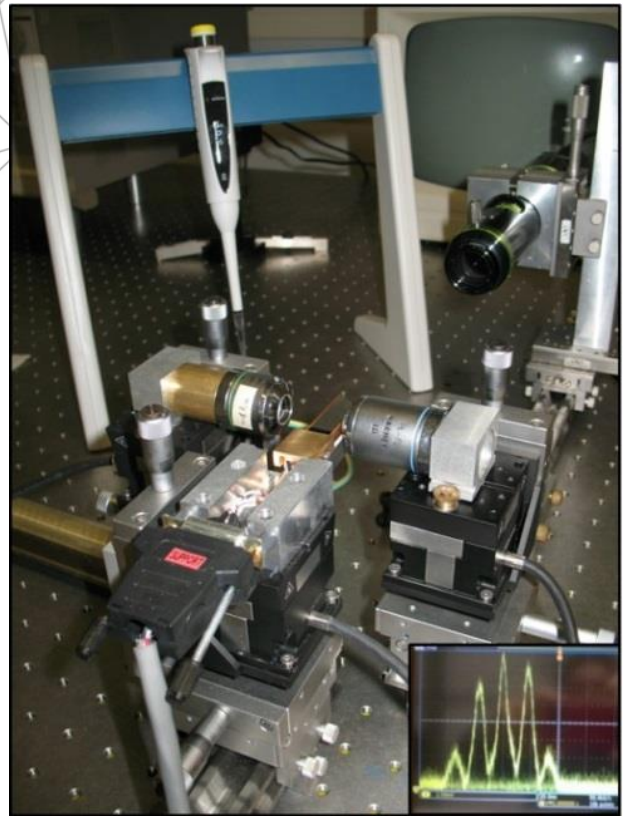
$$P = \text{Optical Perimeter}_{MR} = k.\lambda$$

(Notion of photonic's orbital)

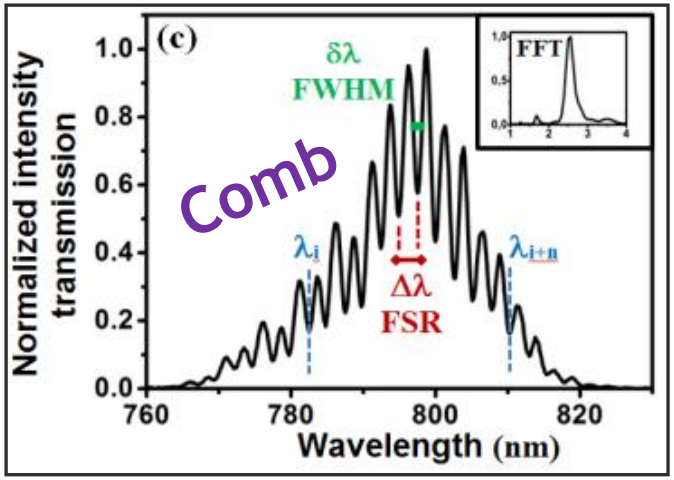
($k \in \mathbb{N}$)

Light wavelength comb : quantified light

Micro-optical injection plus a *Optical Spectral Analyzer* or *Spectrometer*
(see slide 22 diffraction for analyzer)



Spectral quantification
Comb's creation



Comb of colors :
Various colors exist (or not) into the Micro-Resonator (MR)

"Integrated quantified *probe* light"

Pseudo-period 'FSR'
'FHWM'

Study : Impact of a differential mass loss (or water evaporation) directly located upper the Micro-Resonator together with the possibility of measuring its effect by a resonant signal surface at optical frequencies ?

IOP Publishing

Journal of Physics D: Applied Physics

J. Phys. D: Appl. Phys. 53 (2020) 125107 (10pp)

https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab651d

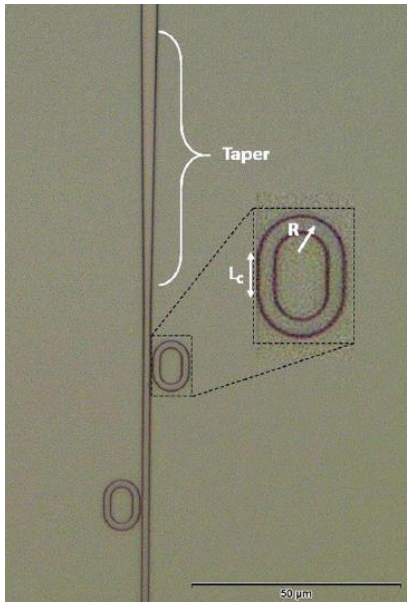
Monitoring the evaporation of a sessile water droplet by means of integrated photonic resonator

Lucas Garnier[1], Hervé Lhermite[2], Véronique Vié[1], Octave Pin[3], Quentin Liddell[3], Hervé Cormerais[2,3], Etienne Gaviot[4] and Bruno Bêche[1,2]

[1] Université de Rennes 1, CNRS (Institut de Physique de Rennes)—UMR 6251, F-35000 Rennes, France
[2] Université de Rennes 1, CNRS (Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes)—UMR 6164, F-35000 Rennes, France
[3] Centrale/Supelec, Campus de Rennes, F-35510 Cesson-Sévigné, France
[4] Université du Maine, CNRS (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine—UMR 6613, F-72000 Le Mans, France

Table 1. Procedure of fabrication of the integrated circuits (v: speed, a: acceleration, t: time, T: temperature, E: exposure dose).

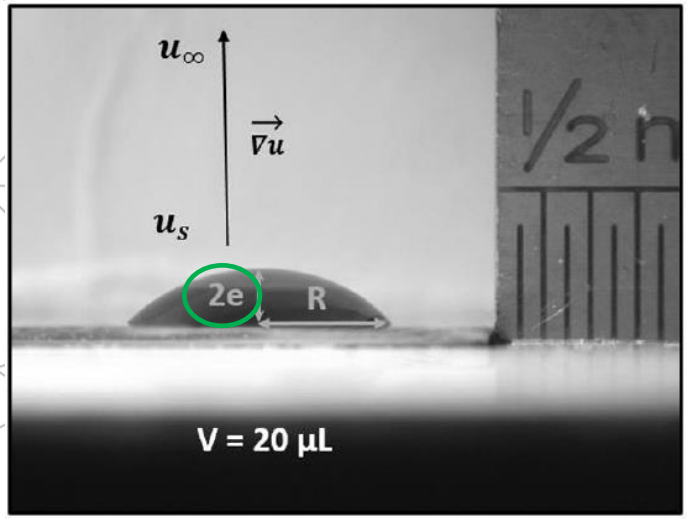
Steps	Parameters
Spin-coating	$v = 900\,\text{rpm}$, $a = 50000\,\text{rpm s}^{-1}$, $t = 30\,\text{s}$, thickness $= 800\,\text{nm}$, roughness $< 3\,\text{nm}$
Softbake	$t = 3\,\text{min}$, $T = 140\,^{\circ}\text{C}$
Deep UV exposure	$E = 20\,\text{mJ cm}^{-2}$, $t = 27\,\text{s}$
Post exposure softbake	$t = 1\,\text{min}$, $T = 120\,^{\circ}\text{C}$
Development	$t = 30\,\text{s}$ with Microposit MF CD-26
Final softbake	$t = 12\,\text{h}$–$14\,\text{h}$, $T = 120\,^{\circ}\text{C}$



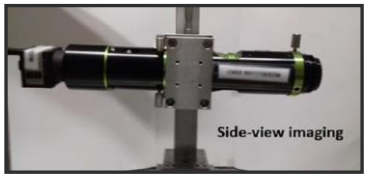
Photolithography and processes

Imaging the evaporation mechanism

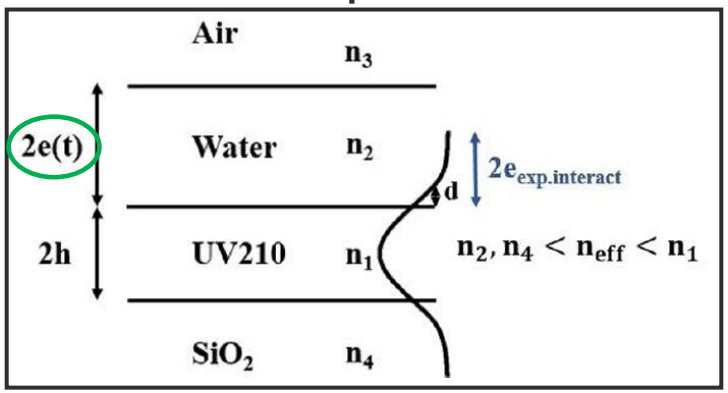
Water droplet evaporation

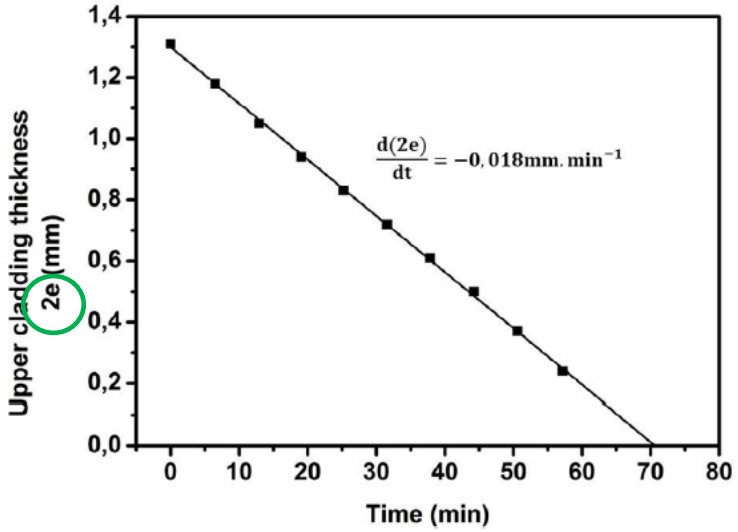


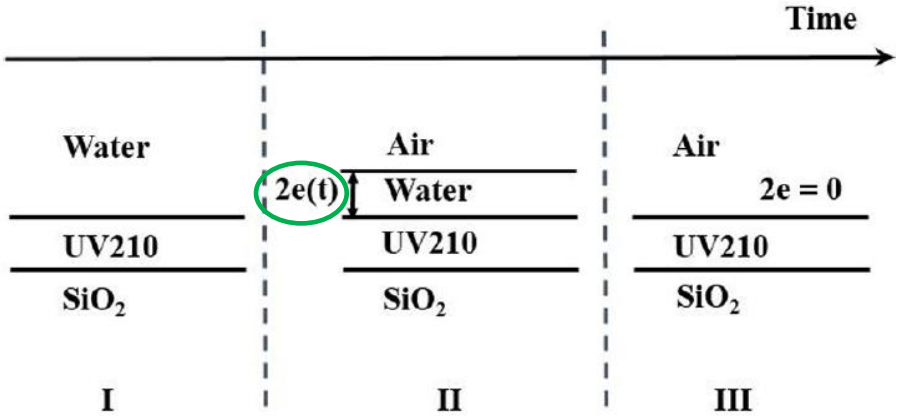
Camera



Evaporation mechanism

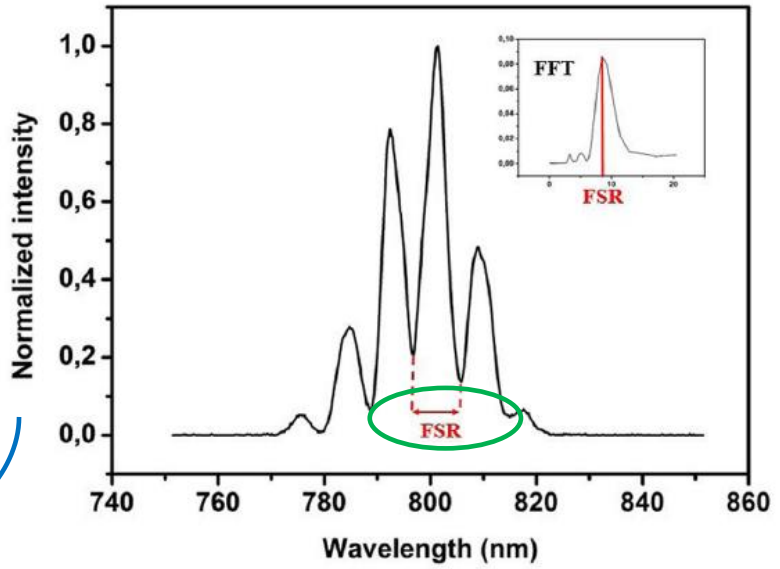




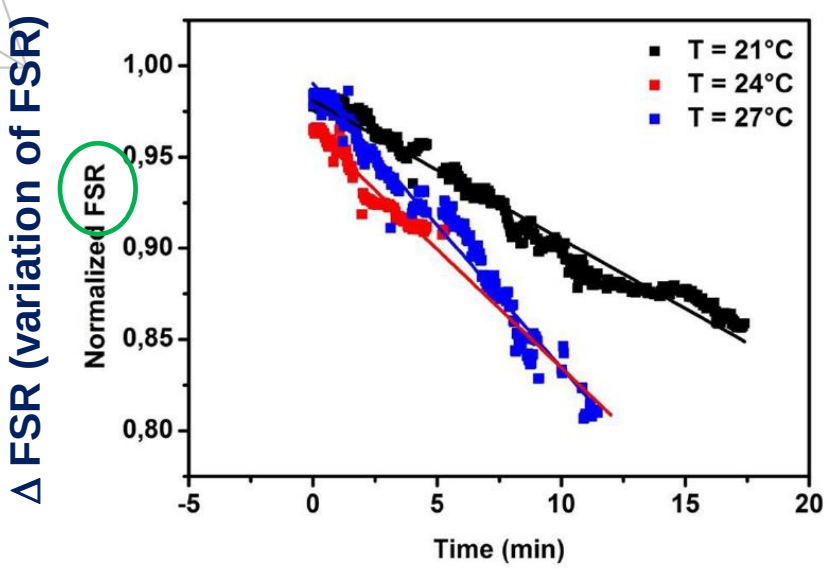


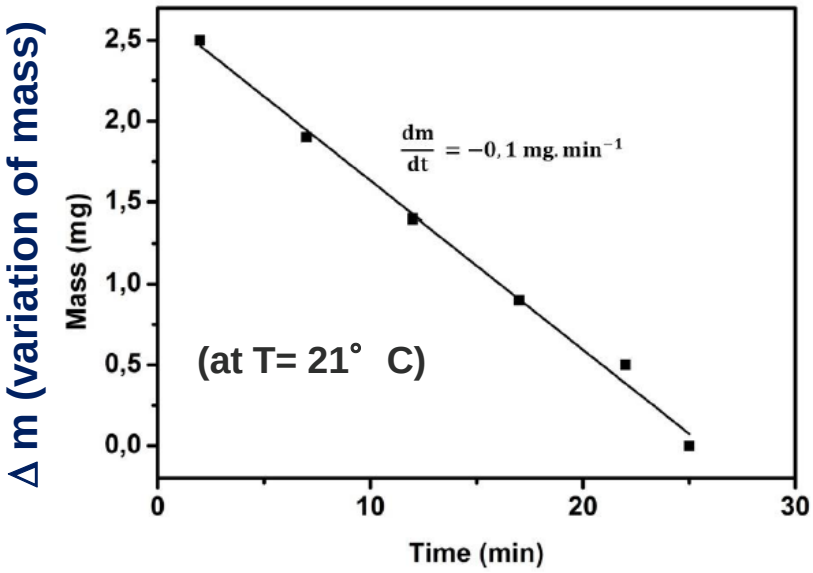
Correlated optical resonant signal

Spectral quantification
Comb's color



Corresponding Δm_{water} evaporated



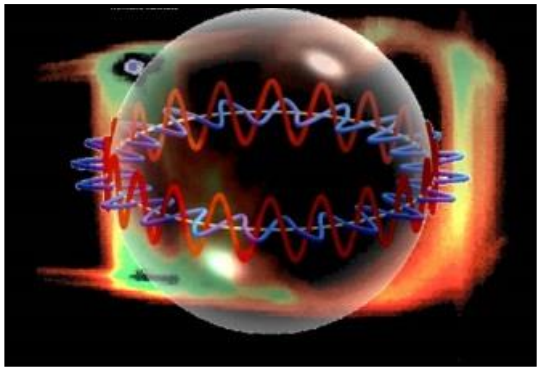


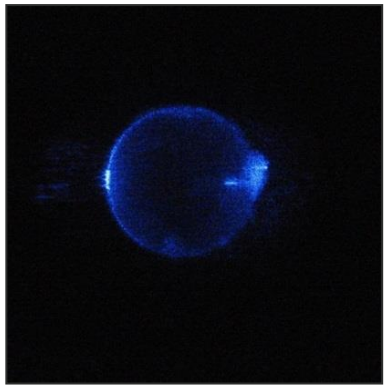
Question : In such same manner and resonant technology, is it possible to detect an addition or sedimentation of material (mass) ?

Thank you for you attention

https://www.ietr.fr/bruno-beche

Artist view of the phenomenon…





…towards the reality