



**HAL**  
open science

**“ 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.

**Pour une Ambition Scolaire Scientifique**



[https://www.ietr.fr/  
bruno-beche](https://www.ietr.fr/bruno-beche)

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

Lycée Fulgence Bienvenüe à Loudéac (Angélique Simoneau Le Sager)  
Collège Louis Guilloux de Ploemeur  
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](#)



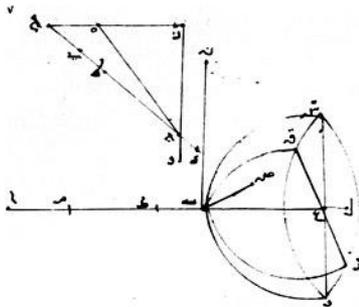
# La Lumière en 'rayon' : Géométrie

Ibn Sahl



An 984 (Mathématicien, Bagdad)

1<sup>ère</sup> mention des lois de la réfraction de la lumière



لانه ان ماتمه عليها سطح مستوي وغيره فالان هذا الشئ ينقطع سطحه من  
 على نقطة تسمى فلا بد من ان ينقطع احد الخطين بـ ن من غير ان يكون ذلك  
 الخط مستويا والفضل المشهور من هذا السطح ويزن سطحه قطع في  
 خط مستوي فالات هذا السطح ياتي من مسيطر م على نقطة تسمى نقطه  
 مستوية في سطحه على نقطة تسمى مركزه خط مستوي وفلا محال  
 فلا ياتي مسيطر م على نقطة تسمى مسيطر م سطحه مستوي من سطحه مستوي

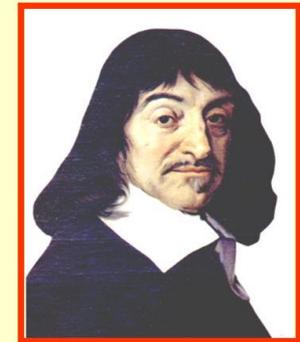
Willebrord Snell



Astronome, Mathématicien  
hollandais

René

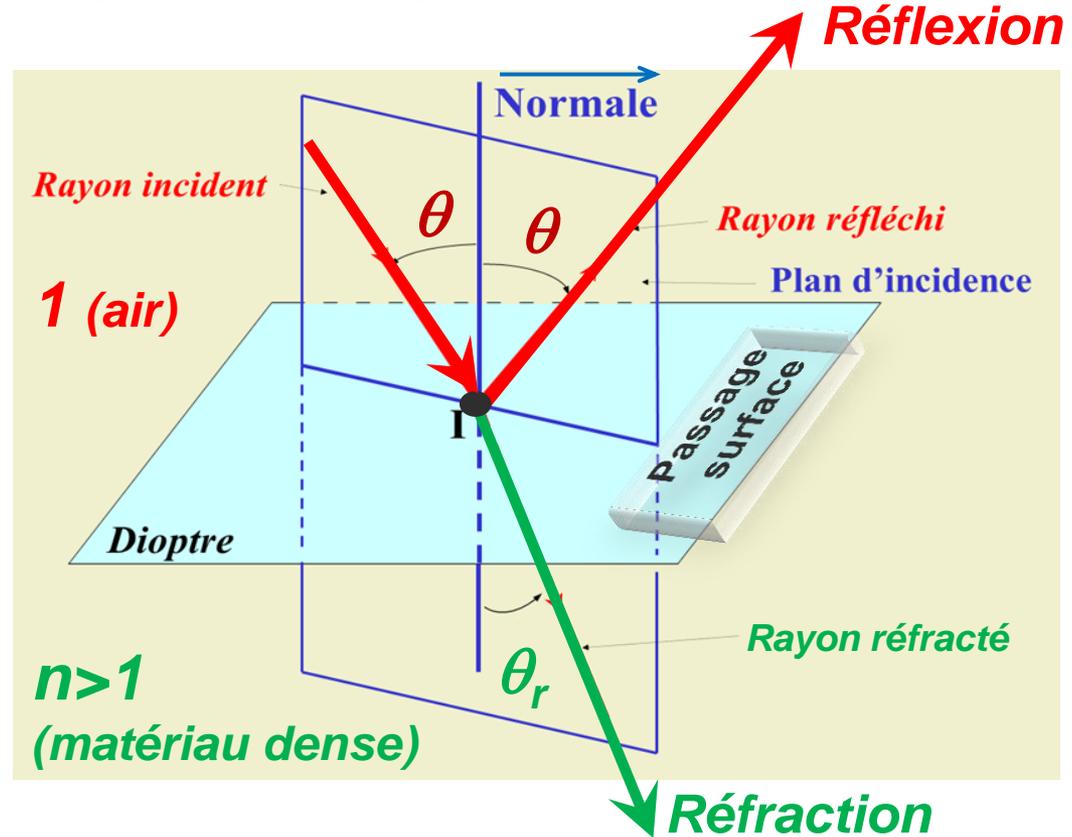
Descartes



Philosophe, Mathématicien,  
Physicien français



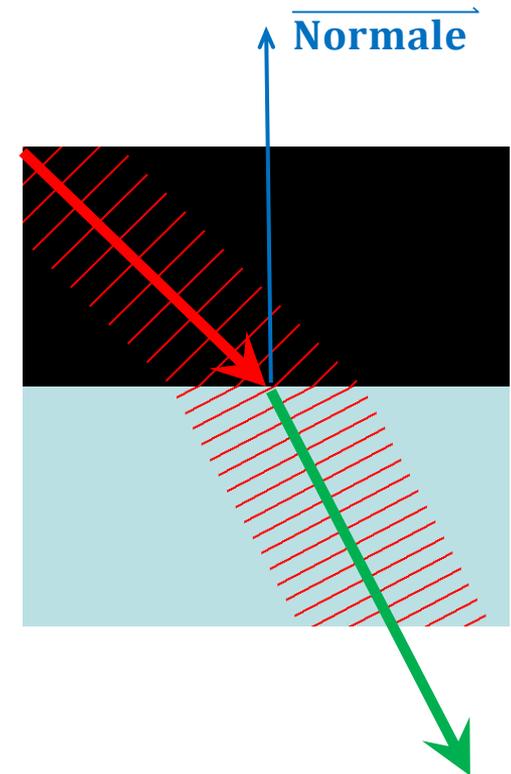
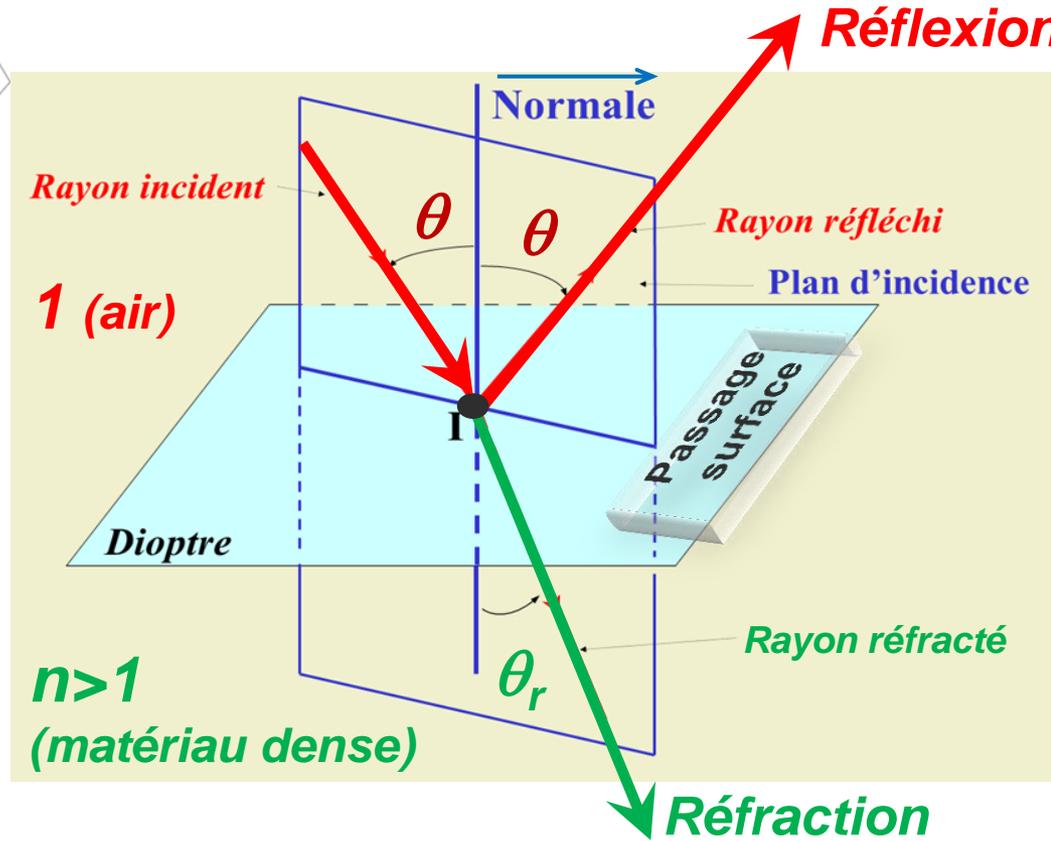
# La Lumière en 'rayon' : Géométrie (trigonométrie)



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')

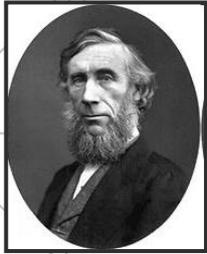
# La Lumière en 'rayon' : Géométrie



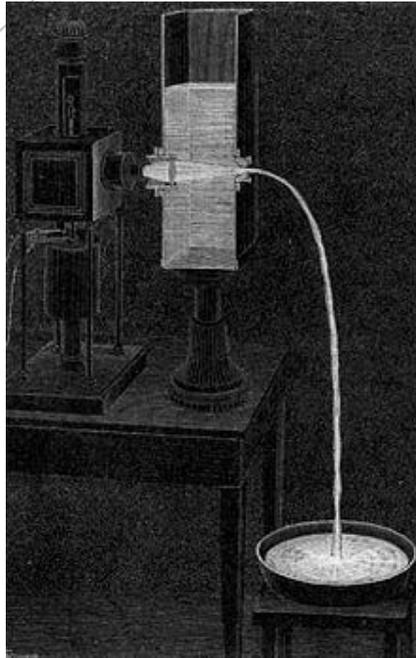
**Onde réfractée** : le changement de direction = un changement de vitesse

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): 1<sup>ère</sup> 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)...

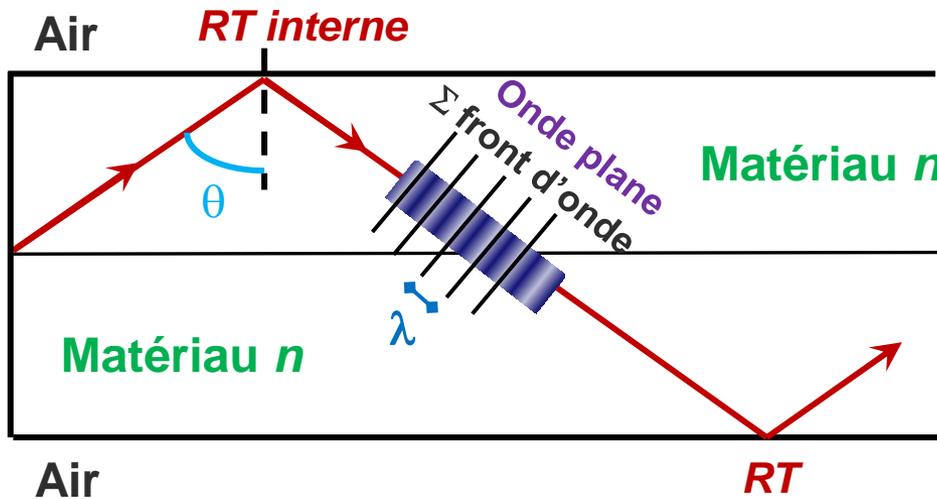
**Fontaine de Lumière** ou « **guider la lumière** » par un jet d'eau d'indice plus élevé que l'air (Indices optiques : fluide eau  $n_{\text{eau}}=1,33$  en lumière visible et  $n_{\text{air}}=1$ ).



# 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)

- Schéma : propagation par RT successives (ZIG/ZAG)  
Couche plane de matériau (indice optique  $n$ ) = ‘guide plan’



$E_p$  : Epaisseur du Matériau d'indice  $n$   
ou Guide d'onde

axe optique (a.o.)  
direction de la propagation

## THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL

DEVOTED TO THE SCIENTIFIC AND ENGINEERING  
ASPECTS OF ELECTRICAL COMMUNICATION

Volume 48

September 1969

Number 7

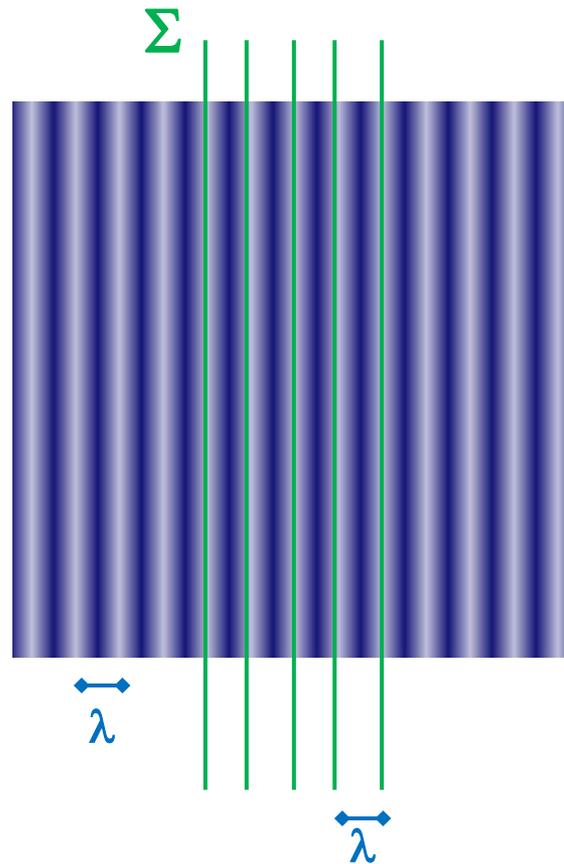
Copyright © 1969, American Telephone and Telegraph Company

### Integrated Optics: An Introduction

By STEWART E. MILLER

(Manuscript received January 29, 1969)

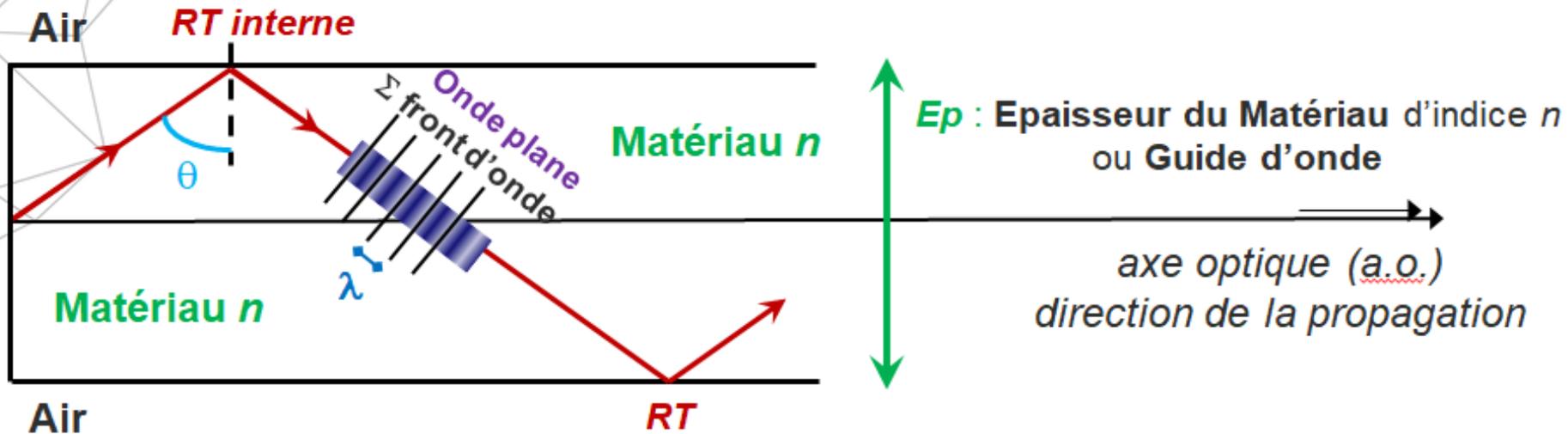
# Le 'modèle' de l'Onde Plane



Onde plane, vague avec **front d'onde  $\Sigma$**  et longueur d'onde  $\lambda$

# 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 1<sup>ère</sup> quantification ( $m$  un nombre entier) :

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

(simplification  $\varphi_r=0$ )

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

# La Lumière : Historique (XVII-XX<sup>èmes</sup> Siècles)

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



Ritter 1801  
UV

~1600

Diffusion  
Réflexion

Physique de...

L'onde et du Corpuscule

$$\lambda \cdot f = c$$

$$h \cdot f = E$$

Energie

fréquence

célérité

~1800



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

Réflexion  
Transmission  
Diffraction  
Interférence

~1900

Corpuscule  
Photon

## 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 Musschen 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 : Maxwell propose les lois de 'l'électromagnétisme'**

1887-1893 : Hertz découvre les ondes radioélectriques qui confirment expérimentalement les équations de Maxwell

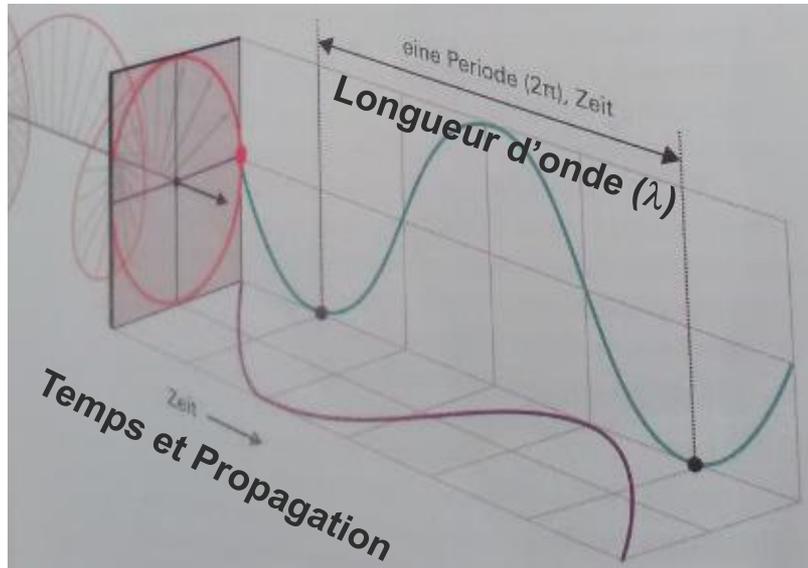
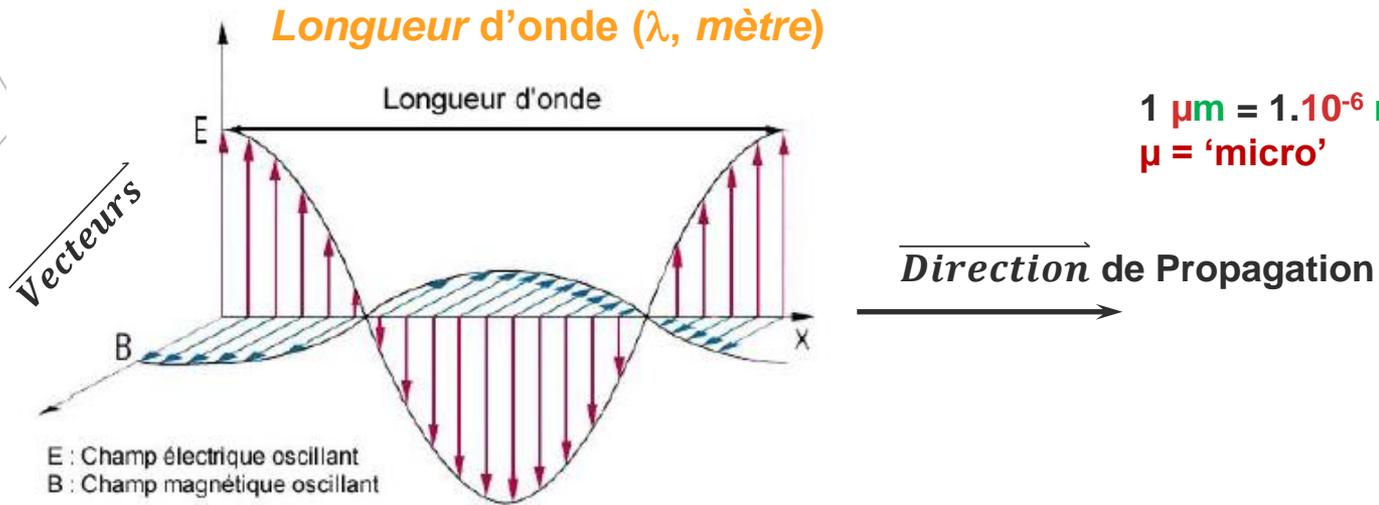
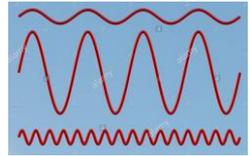
1887 : Expérience de Michelson

**1905 : Einstein crée la relativité restreinte qui unifie la mécanique et l'électromagnétisme**

**1949 : Feynman, Schwinger ... unifient la mécanique quantique et l'électromagnétisme, c'est l'électrodynamique quantique**

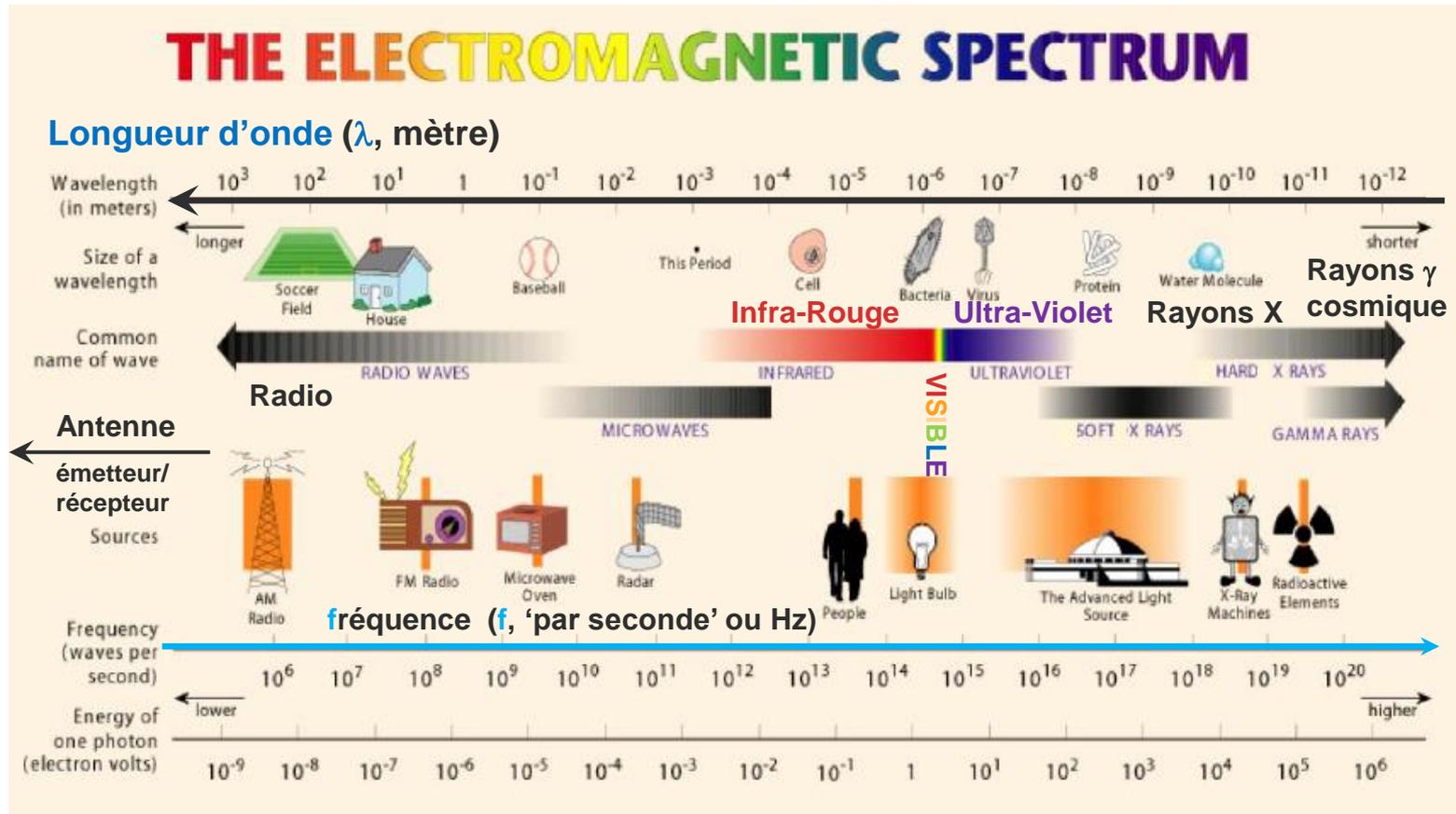
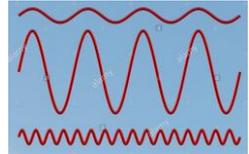
Lecture... et détails

# La Lumière en tant qu'Onde



- Sinusoïdes ou 'ondulations/oscillations' (*cos*, *sin*)
- Electromagnétisme (et donc la lumière)  
Ondes de portées 'infinies'  $\rightarrow \infty$

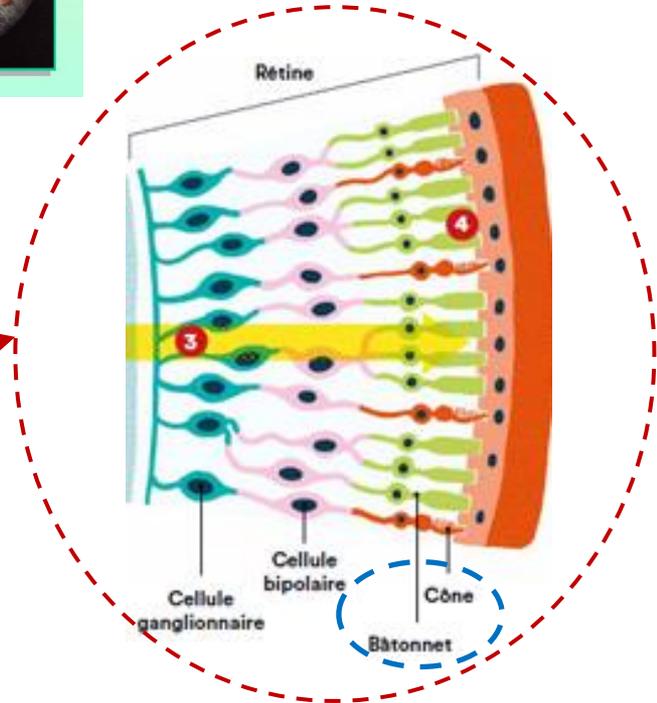
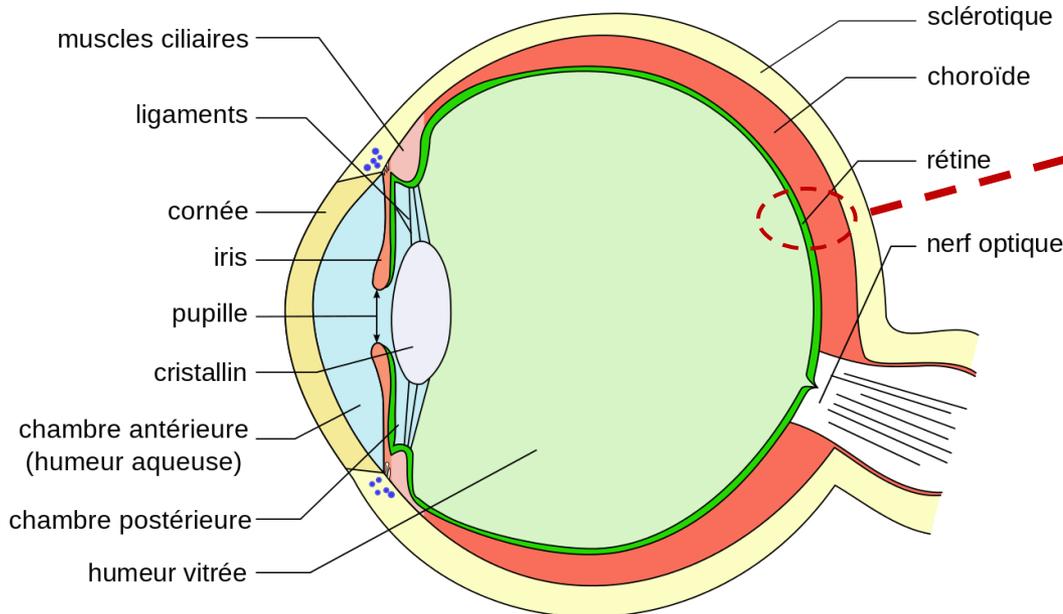
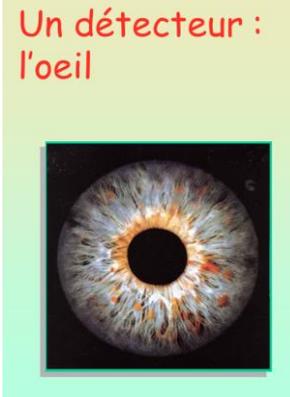
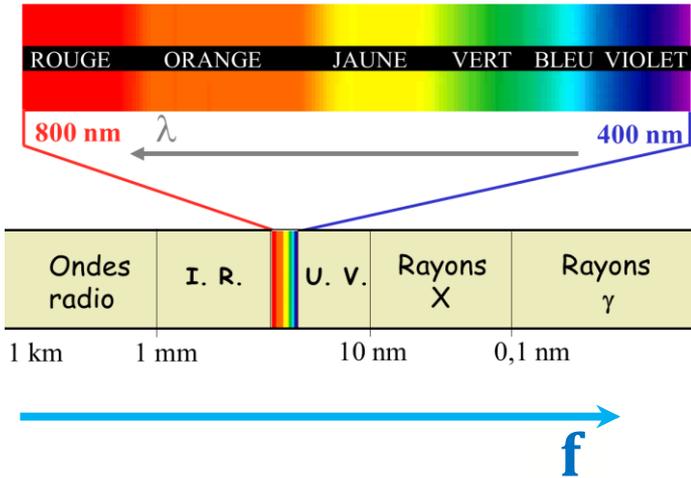
# La Lumière en tant qu'Onde (onde électromagnétique)



$$\lambda \cdot f = c$$

$c$  scalaire, 'célérité de la lumière' (m/s) 'Terre  $\rightarrow$  Lune' en  $\sim 1$  seconde (299 792 458 m/s)

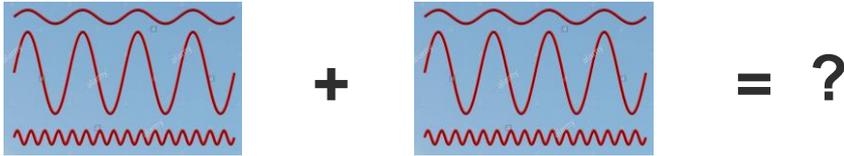
# Le visible et la détection : un exemple



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

# La Lumière en tant qu'Onde (interférences)

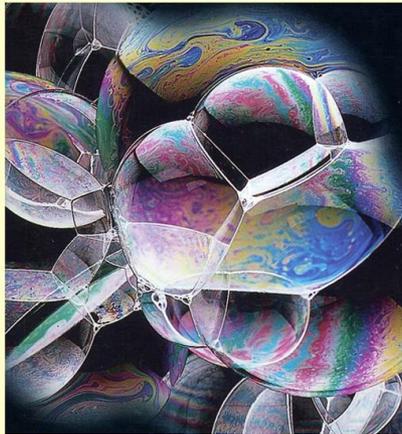
(onde électromagnétique)

 + = ?

Voir fin du lycée/supérieur  
Algèbre des nombres 'complexes'  
 $\mathbb{C} = \mathbb{R} + i\Im$   
Notion de *déphasage*  $\varphi$  en physique

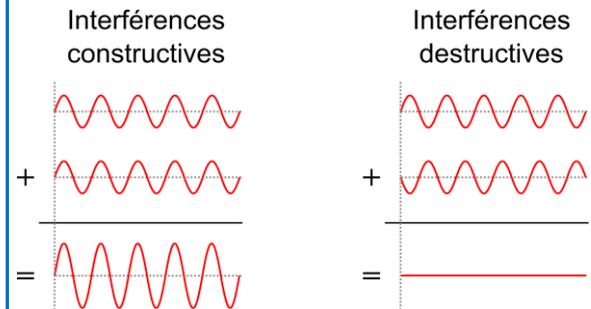
## Nature ondulatoire de la lumière

### Interférences



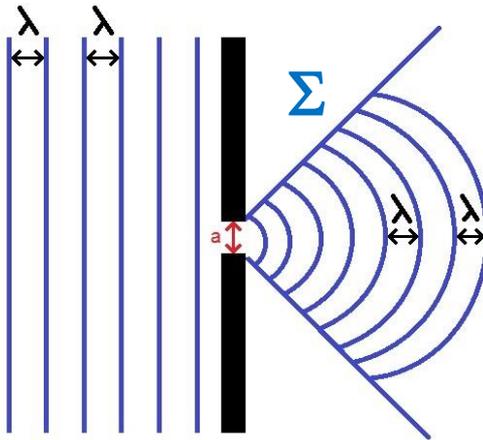
Les couleurs des bulles de savon peuvent être interprétées en considérant la lumière comme une **ONDE**

### Exemples : deux cas particuliers



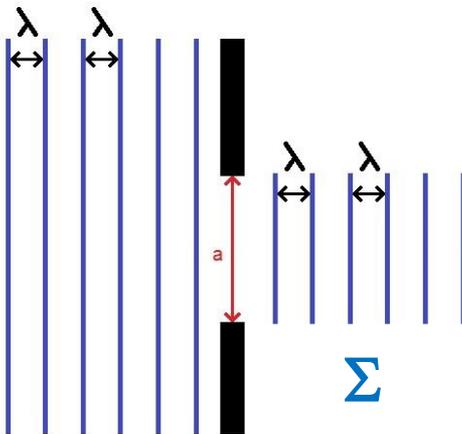
Processus de 'Construction/Destruction' de couleurs

# La Lumière en tant qu'Onde (diffraction)



Le front d'onde  $\Sigma$  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

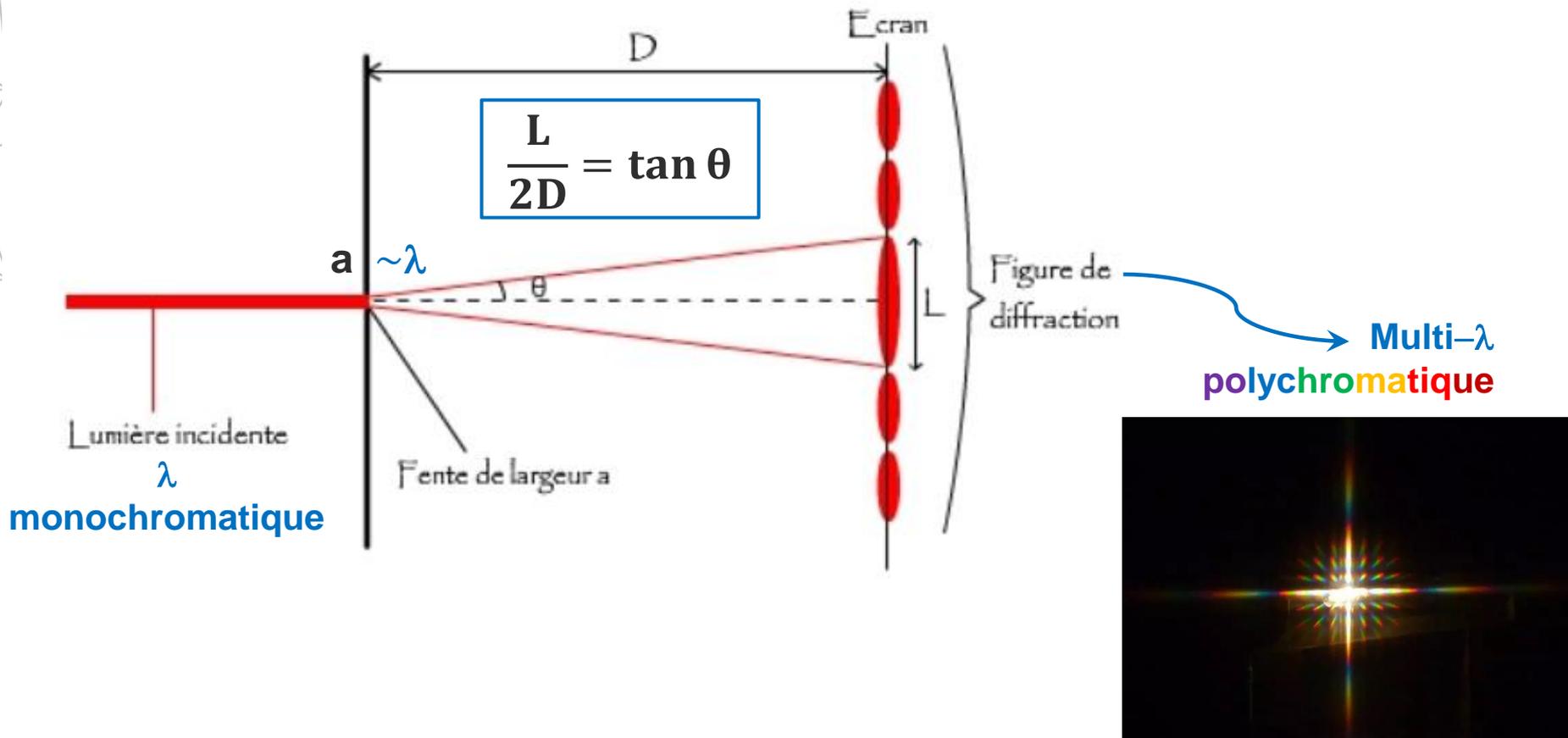
Nature géométrie rayons droits

# La Lumière en tant qu'Onde (diffraction)

(onde électromagnétique)

Diffraction au travers une *pupille* d'une onde de longueur d'onde  $\lambda$  fixée

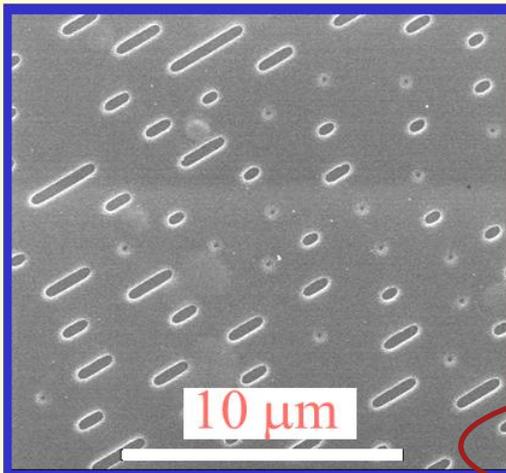
La lumière (onde) prendra *spatialement* une autre *forme* (malléable) autre que le rayon incident 'droit'. Cette forme dépendra de la nature de la pupille, fente, trou ... traversé.



# La Lumière en tant qu'Onde (diffraction)

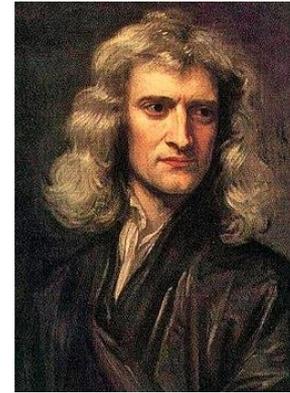
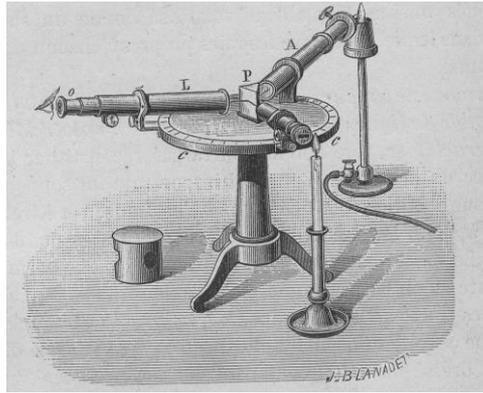
(onde électromagnétique)

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

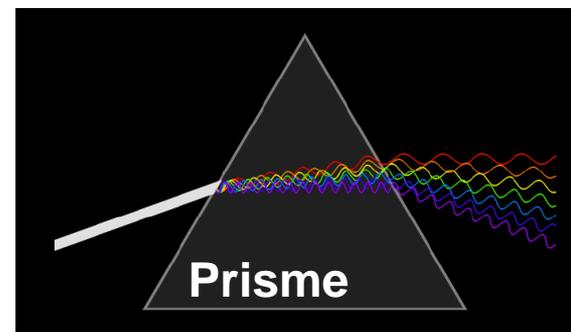
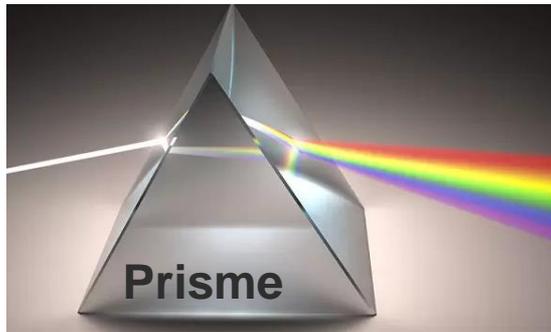


Déviat[i]on (diffraction) différent[e]  
suivant la couleur

# La lumière 'décomposée' : propriétés et constitution



Newton (1666)



violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge

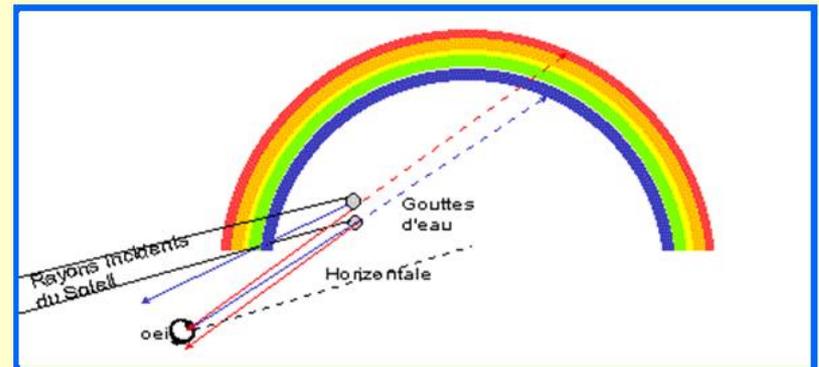
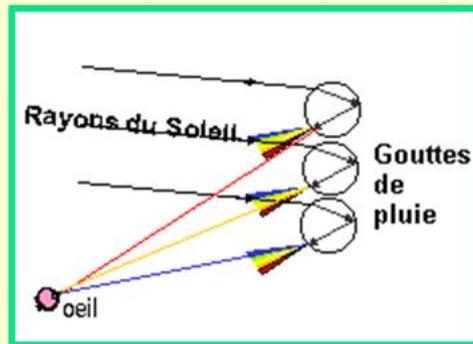
L'indice de réfraction  $n$  du matériau varie avec la longueur d'onde  $\lambda$   
(ou la fréquence  $f$ ) de la lumière qui l'éclaire :  $n(\lambda)$  ou  $n(f)$

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

# La lumière 'décomposée' : propriétés et constitution

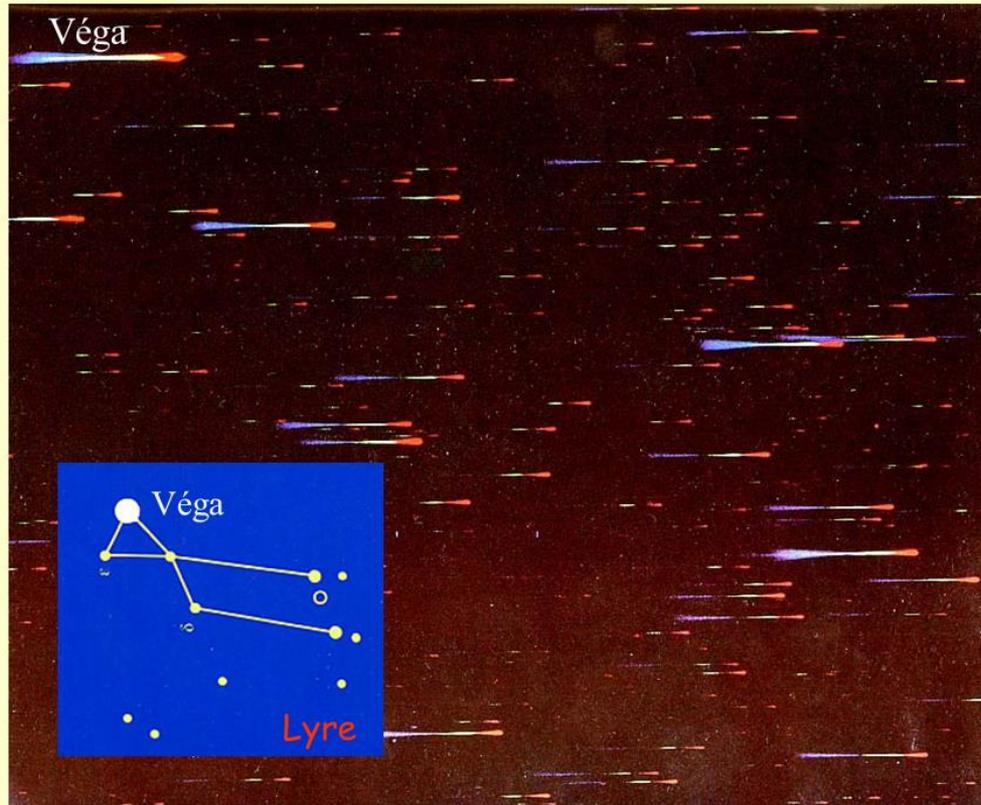
## Arc-en-ciel

- Déviation de la lumière par des gouttes d'eau
- L'indice  $n$  de l'eau dépend de  $\lambda \rightarrow$  déviation différente suivant la couleur



# La lumière 'décomposée' : propriétés et constitution

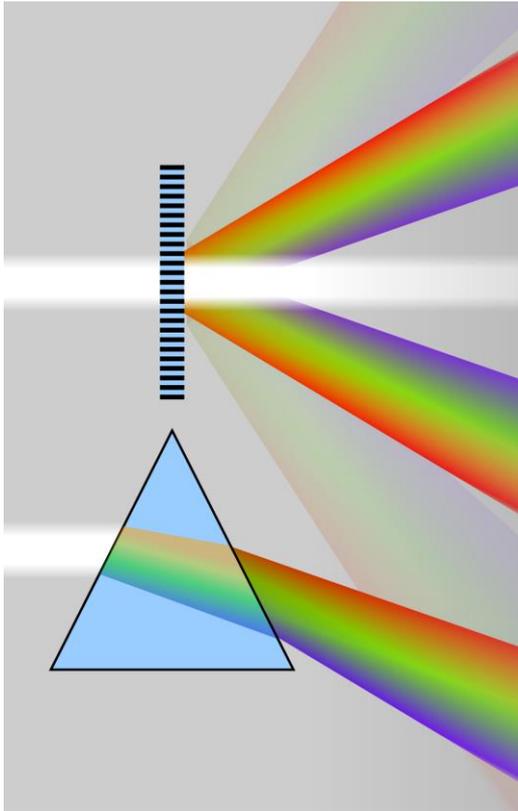
## Constellation de la Lyre vue à travers un prisme



Simple prisme =

Séparation des rayonnements par la dispersion → **Analyseur**

# La lumière 'décomposée' : Dispositifs Analyseurs

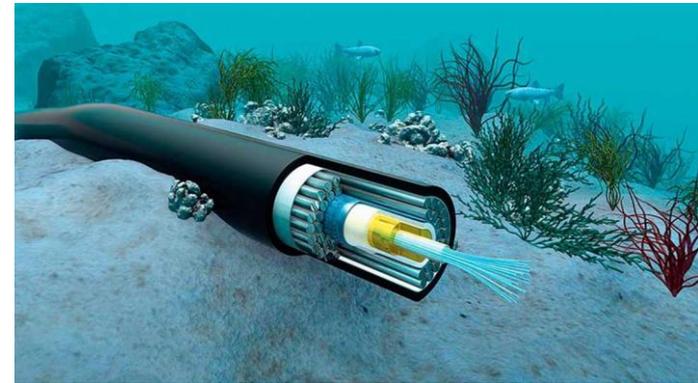


## En conclusion : Les rayonnements

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

# Integrated light on chip : Integrated photonics

## Optical fibers



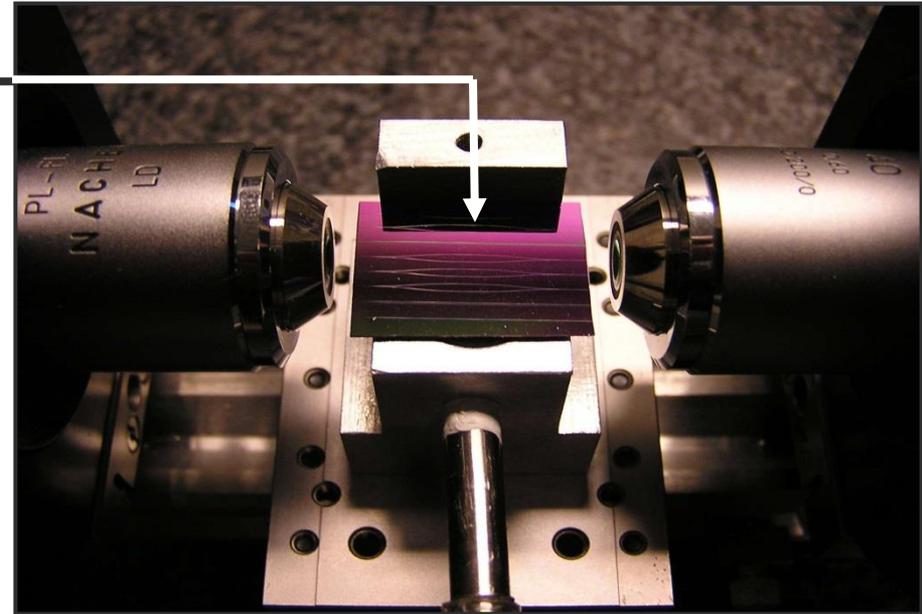
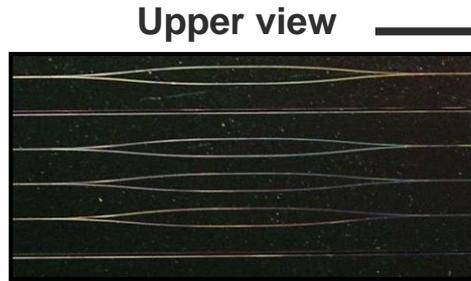
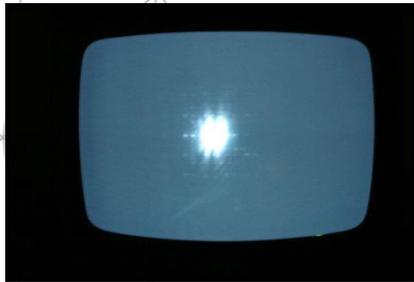
1,500,000 kilometers of cables laid on ocean floors (i.e.> 36 times around the Earth)

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

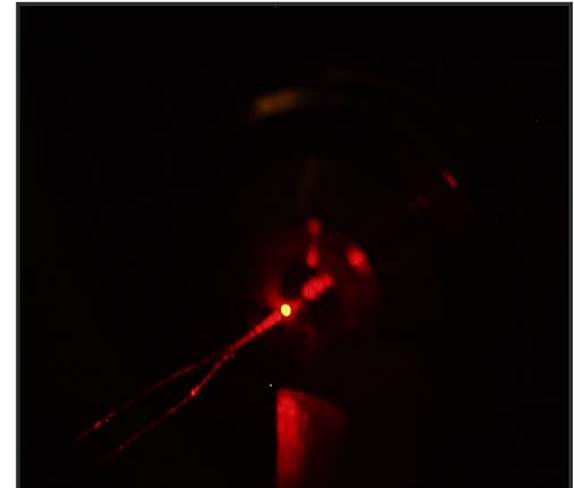
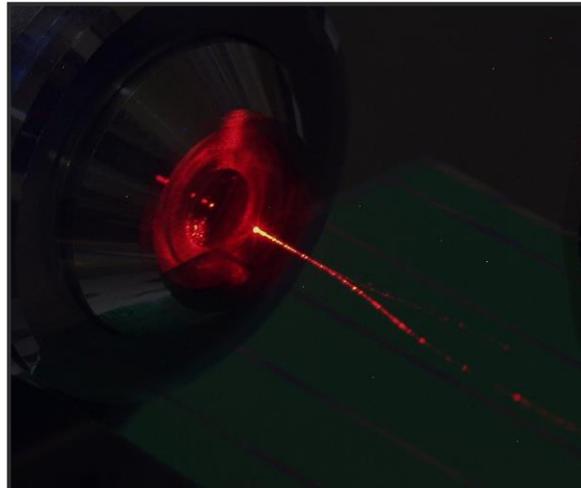
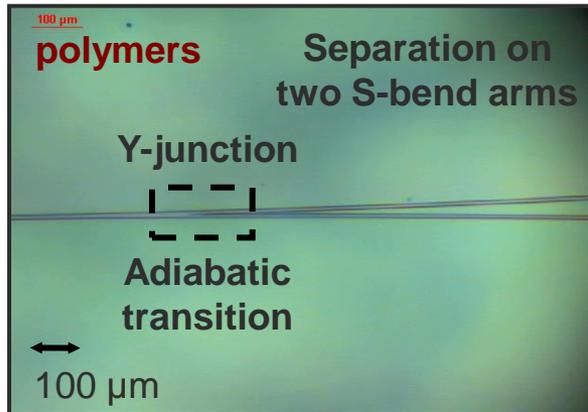


+ specific components, such as :  
modulators, amplifiers, filters...

# Integrated light on chip : integrated photonics



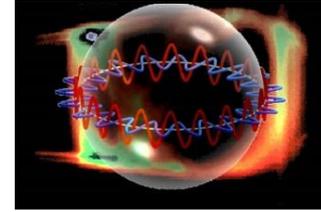
Propagation single-mode  
High optical confinement



# The resonant waves or Whispering Gallery Modes

Artist's view of the phenomenon

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

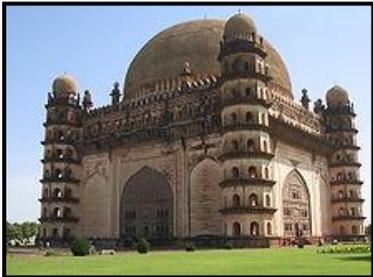


- At the origin, discover in *acoustic* (Lord Rayleigh → theory in 1910-1914)
- Type of waves which can propagate along the concave surface (grazing reflection) + 'tuning' if cycle ! *Notion of resonance.*

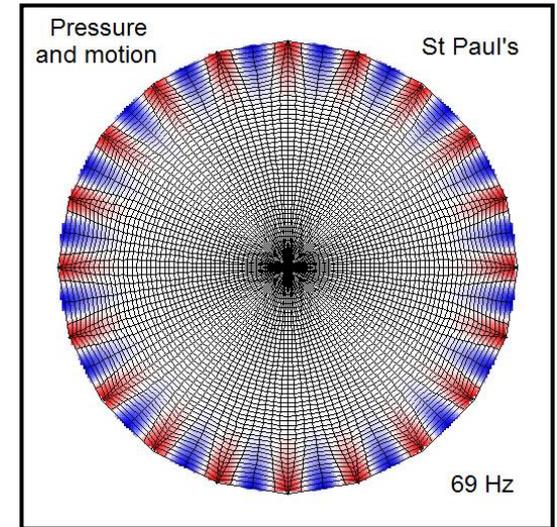
St Paul Cathedral - London – United Kingdom



Gol Gumbaz – Bijapur - India



Ex: Compression of the air - acoustic

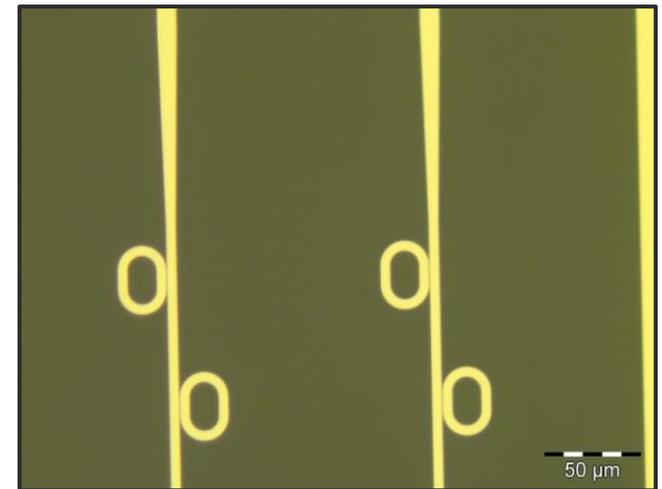
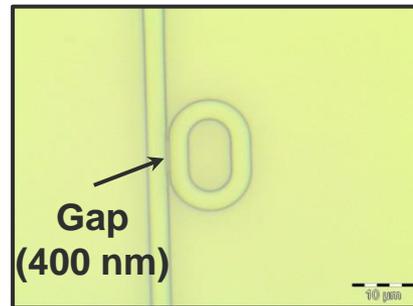
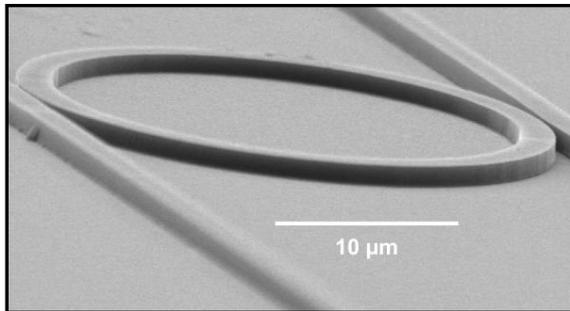
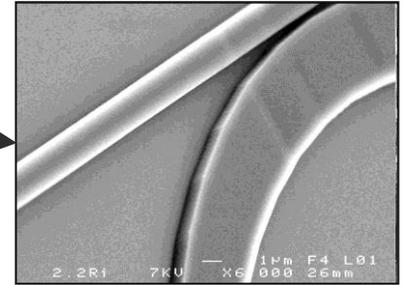
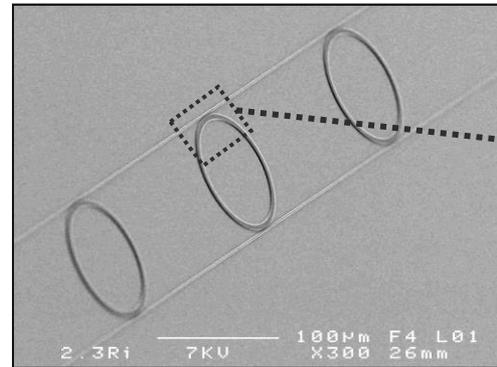
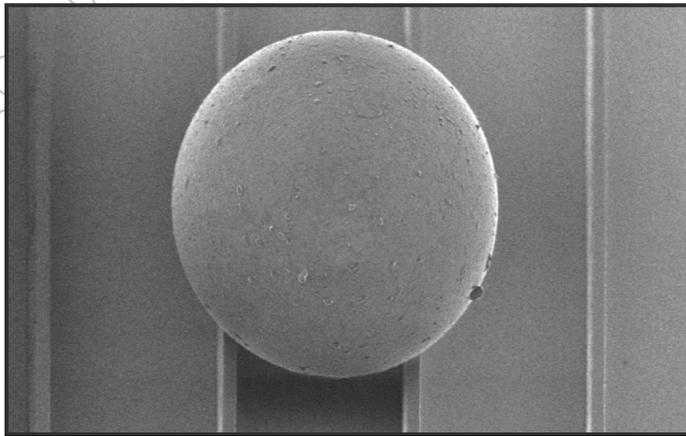


# The resonant light waves or Whispering Gallery Modes

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 :*

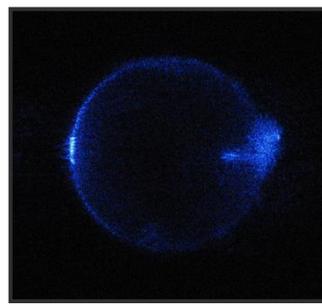
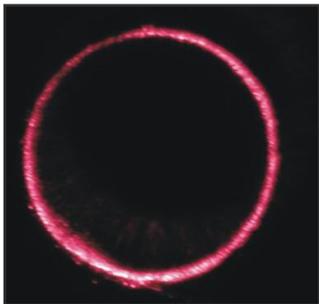


# The resonant light waves or Whispering Gallery Modes

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

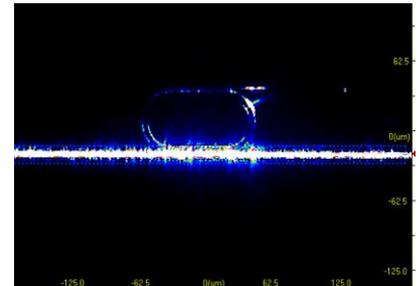
**Optical Micro-Resonators** = seductive objects for *re-cycling the light*

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



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

Whispering gallery mode into a *racetrack*



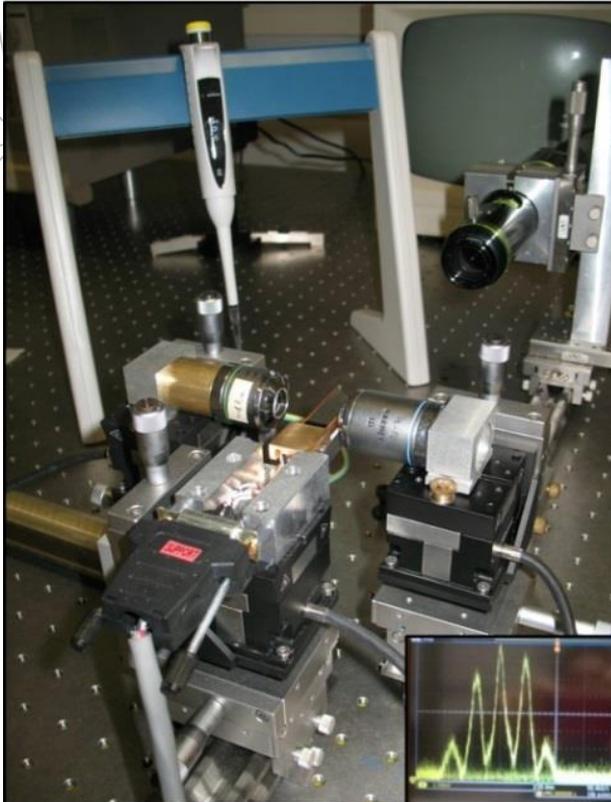
$$P = \text{Optical Perimeter}_{\text{MR}} = k \cdot \lambda$$

(Notion of photonic's orbital)

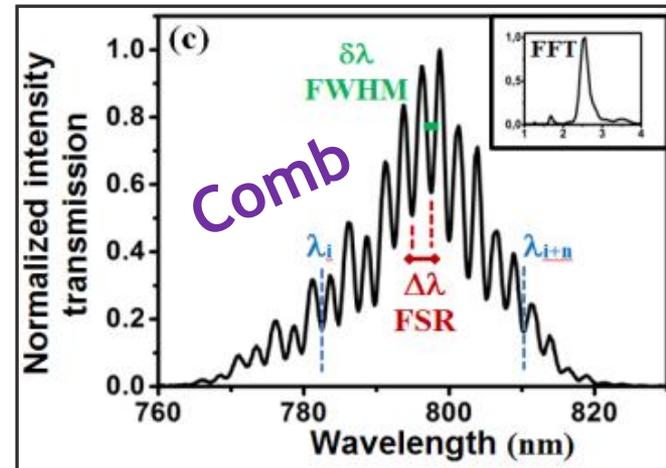
$$(k \in \mathbb{N})$$

# 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’  
‘FWHM’

**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<sup>1</sup>, Hervé Lhermite<sup>2</sup>, Véronique Vié<sup>1</sup>, Octave Pin<sup>3</sup>,  
Quentin Liddell<sup>3</sup>, Hervé Cormerais<sup>2,3</sup>, Etienne Gaviot<sup>4</sup>  
and Bruno Bêche<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université de Rennes 1, CNRS (Institut de Physique de Rennes)—UMR 6251, F-35000 Rennes, France

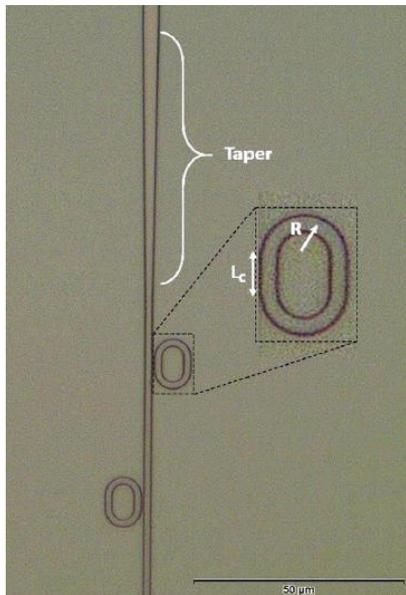
<sup>2</sup> Université de Rennes 1, CNRS (Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes)—UMR 6164, F-35000 Rennes, France

<sup>3</sup> Centrale/Supelec, Campus de Rennes, F-35510 Cesson-Sévigné, France

<sup>4</sup> 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).

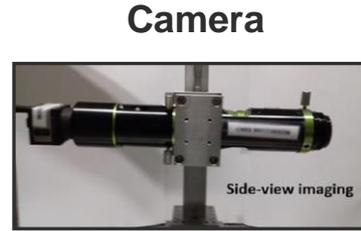
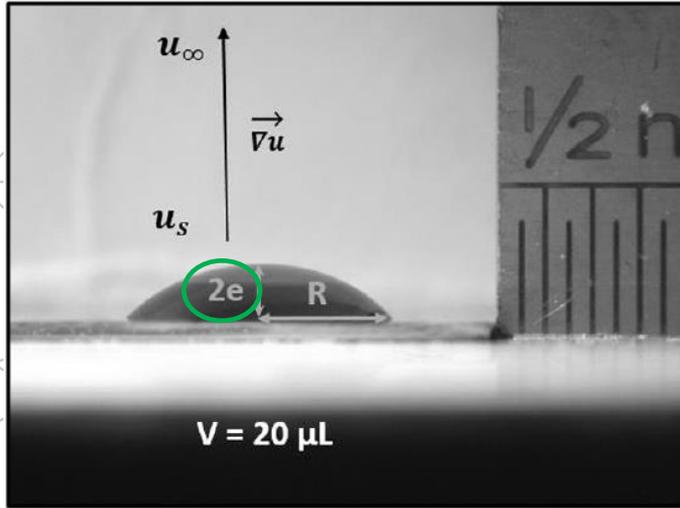
Steps	Parameters
Spin-coating	$v = 900 \text{ rpm}$ , $a = 50000 \text{ rpm s}^{-1}$ , $t = 30 \text{ s}$ , thickness = 800 nm, roughness < 3 nm
Softbake	$t = 3 \text{ min}$ , $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$
Deep UV exposure	$E = 20 \text{ mJ cm}^{-2}$ , $t = 27 \text{ s}$
Post exposure softbake	$t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



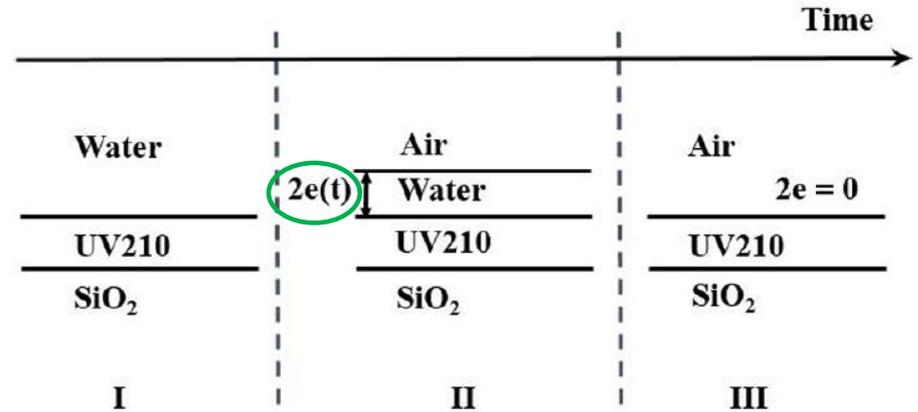
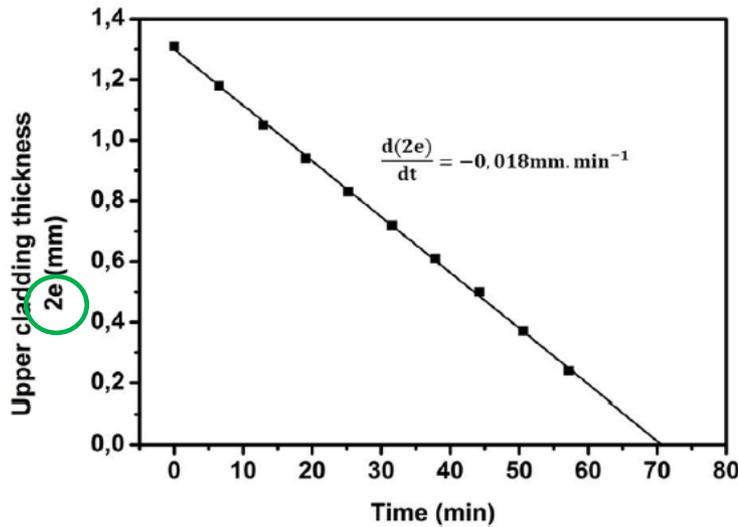
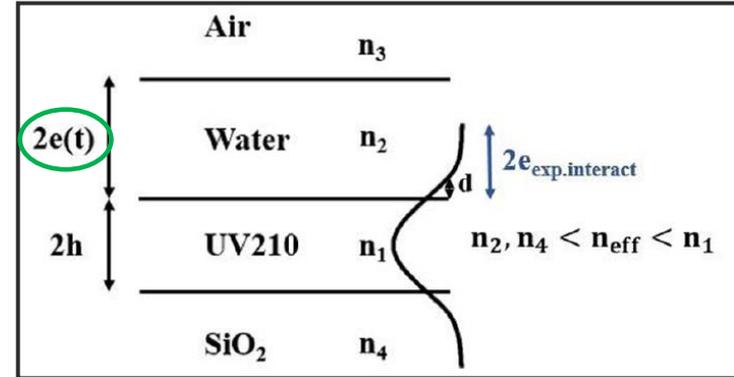
**Photolithography and processes**

# Imaging the evaporation mechanism

## Water droplet evaporation

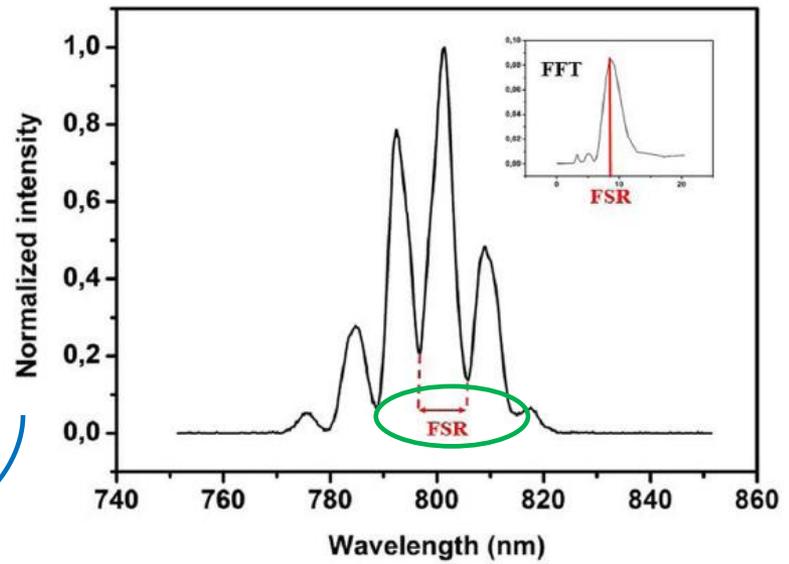


## Evaporation mechanism

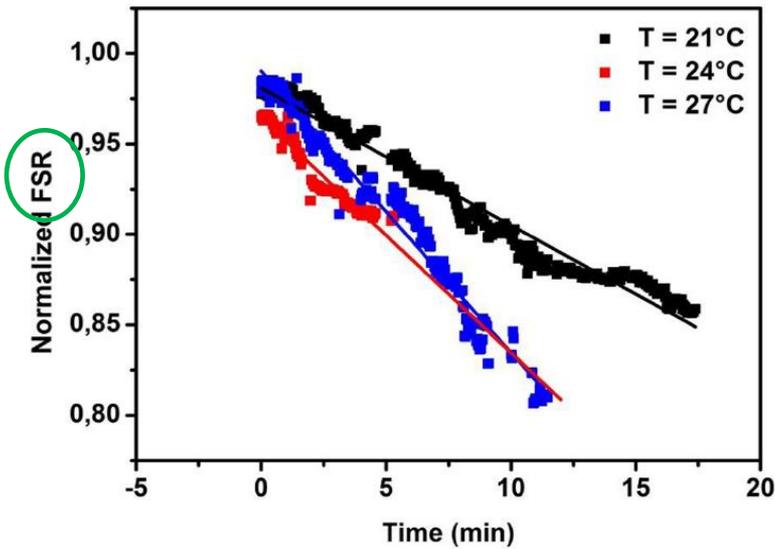


# Correlated optical resonant signal

Spectral quantification  
Comb's color

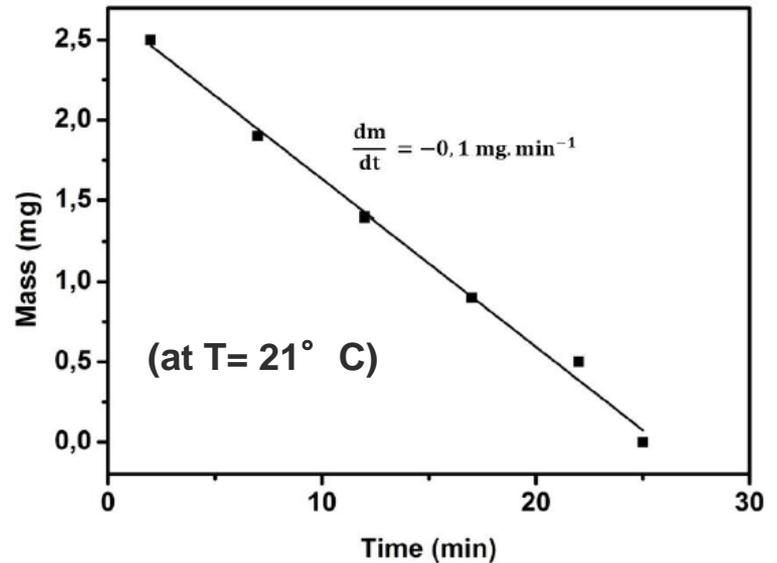


$\Delta$  FSR (variation of FSR)



Corresponding  $\Delta m_{\text{water}}$  evaporated

$\Delta m$  (variation of mass)





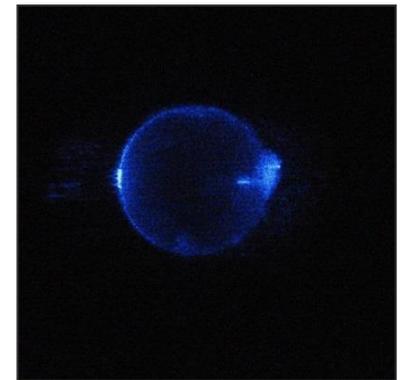
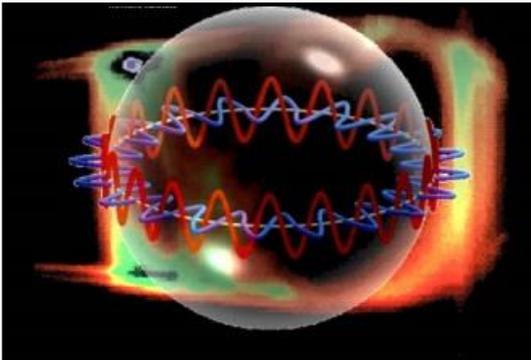
**Question : In such same manner and resonant technology, is it possible to detect an addition or sedimentation of material (mass) ?**

# Thank you for you attention



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

Artist view of the phenomenon...



...towards the reality