



 **IETR**

« Leçon sur l'Optique pour le suivi dynamique de la Matière Molle dans le cadre et l'expérience d'une cordée de la réussite en centre Bretagne : *Pour une Ambition Scolaire Scientifique (PASS)* »

Amphi Lycéen.ne.s, 8 décembre 2023

Bruno Bêche, avec Valérie Guillaume
et Cécile Lecomte (Univ-Rennes)



Université
de Rennes

0. Intro. Les visites / Echanges (collèges-lycées-université) / Séances



Procédés et Matériaux =>



0. Intro. Les visites / Echanges (collèges-lycées-université) / Séances Cordée PASS

Voir les capsules/films de pré-bienvenue & visites à :

<https://spm.univ-rennes.fr/fr/la-cordee-de-la-reussite-pass>

Et une actualité Université de Rennes

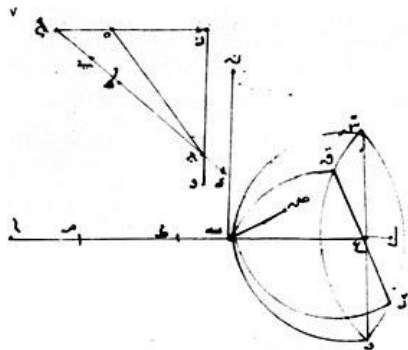
<https://www.univ-rennes.fr/actualites/quand-les-eleves-cherchent-avec-les-chercheurs>

1. La lumière qui se propage en 'rayon' : Géométrie et *historique*

Ibn
Sahl



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



لانه ان ماتمه عليها سطح مستوي غيره فلا ان هذا السطح يقطع سطح من
سطح نقطة سب فلا بد من ان يقطع احد خطي م ب ن من غير ان ذلك
الخط مستوي والنصل المشدود بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر
خط مستوي فلا ان هذا السطح ياتر من سطح م ب على نقطة د ت فخط
م ب يقطع ق ر قطع ق س د على نقطة ت و ك ان خط مستوي يقطع
فلا ياتر من سطح م ب على نقطة س ب سطح مستوي غير سطح م ب ن ص ٥

Willebrord
Snell



Astronome, Mathématicien
hollandais

René
Descartes



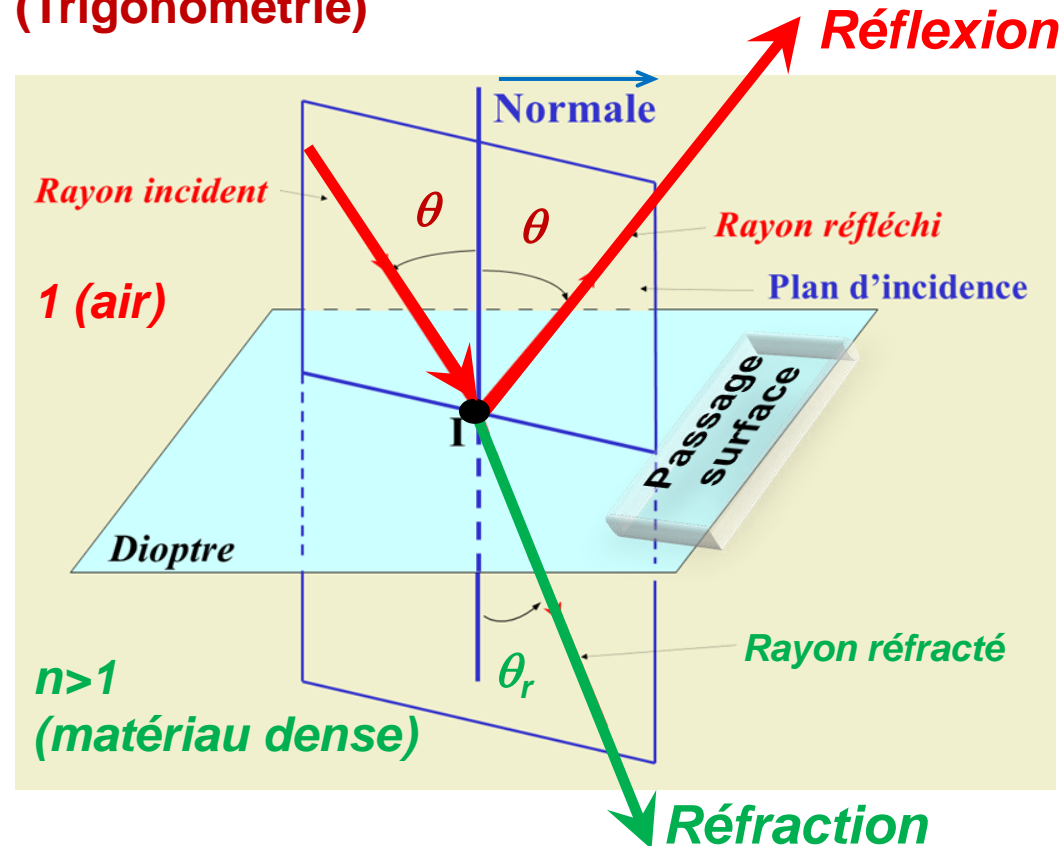
Philosophe, Mathématicien,
Physicien français



1. La lumière qui se propage en 'rayon' : Géométrie

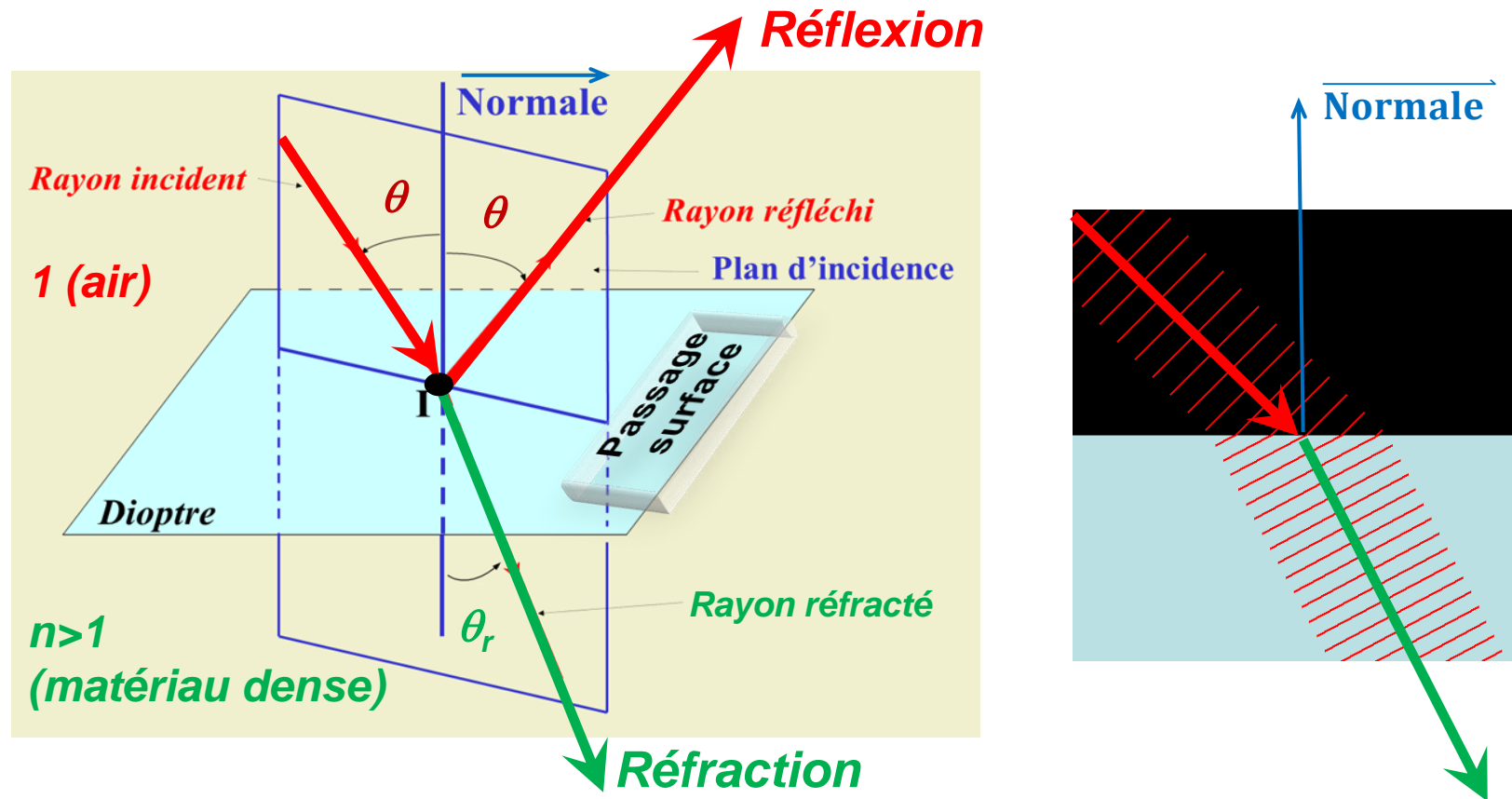


(Trigonométrie)



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).**

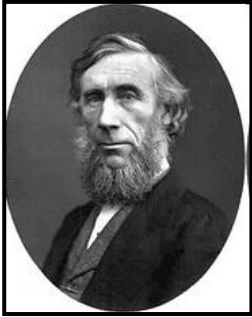
1. La lumière qui se propage en 'rayon' : Géométrie



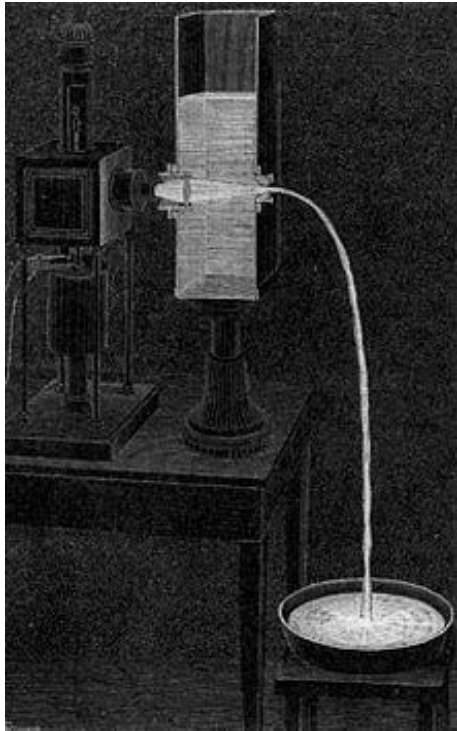
Onde réfractée : le changement de direction = un changement de vitesse

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

1. La Lumière/rayon 'piégé.e': Guidage par Réflexion Totale (RT)



John Tyndall (Irlandais, 1820-1893): 1^{ère} 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)...

1. La Lumière/rayon 'piégé.e': Guidage par Réflexion Totale (RT)

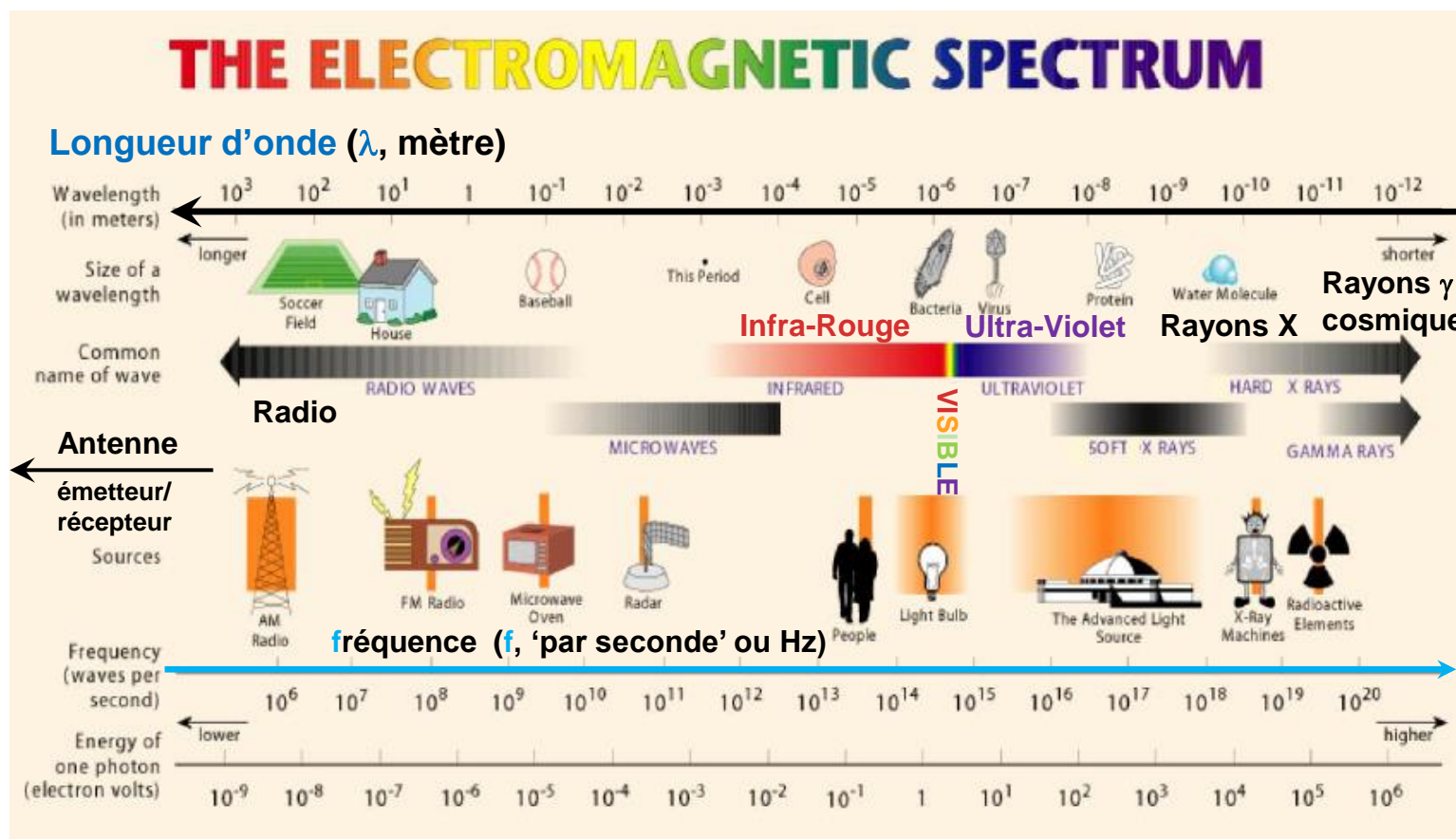
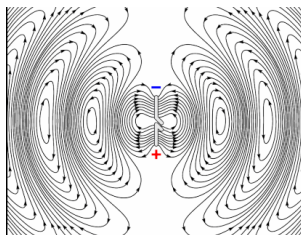
Fontaine de Lumière ou « guider la lumière » par un jet d'eau d'indice plus élevé que l'air (Indices optiques : fluide eau $n_{\text{eau}}=1,33$ en lumière visible et $n_{\text{air}}=1$).



2. La Lumière en tant qu'Onde



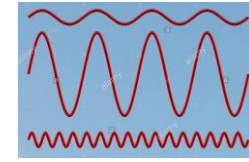
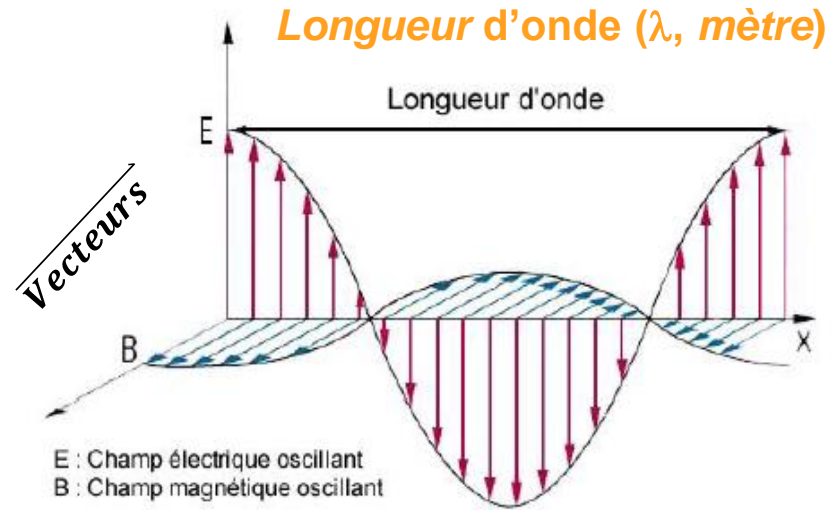
Onde électromagnétique



$$\lambda \cdot f = c$$

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

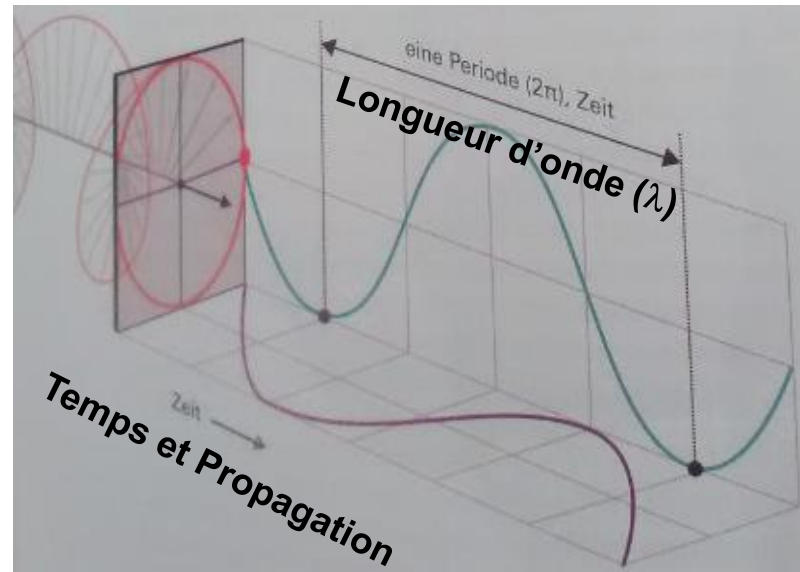
2. La Lumière en tant qu'Onde



$$1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,000001 \text{ m}$$

$\mu = \text{'micro'}$

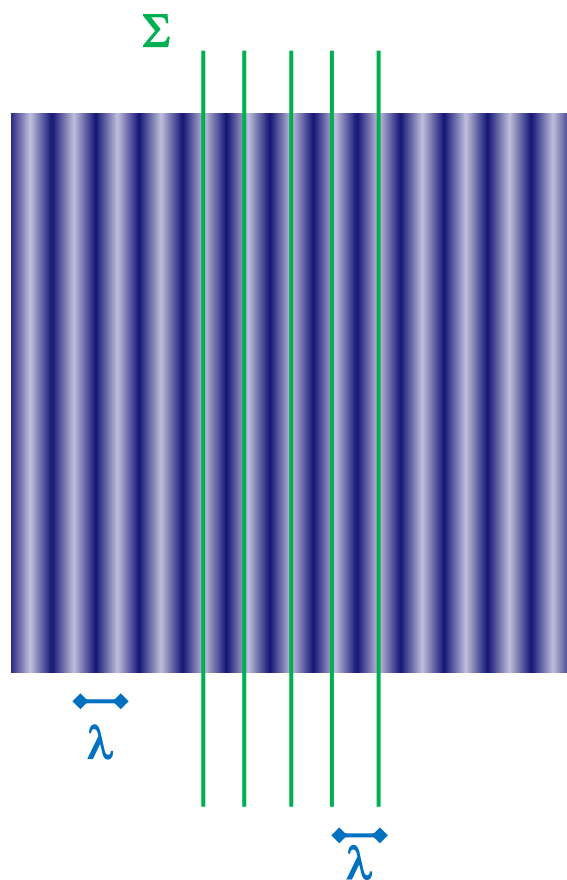
Direction de Propagation

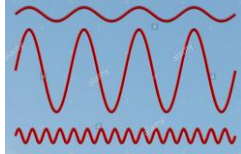
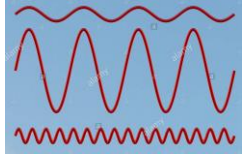


- Sinusoïdes ou 'ondulations/oscilations' (*cos*, *sin*)
- Electromagnétisme (et donc la lumière)
Ondes de portées 'infinies' $\rightarrow \infty$

2. La Lumière en tant qu'Onde : les interférences

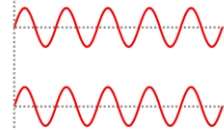
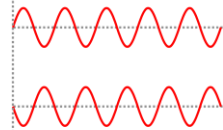
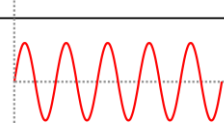
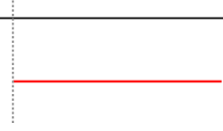
Le 'modèle' de l'Onde Plane



 +  = ?

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

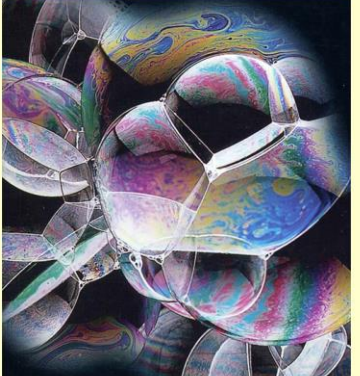
Exemples : deux cas particuliers

Interférences constructives	Interférences destructives
	
+	+
	
=	=

Processus de 'Construction/Destruction' de couleurs

Nature ondulatoire de la lumière

Interférences



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

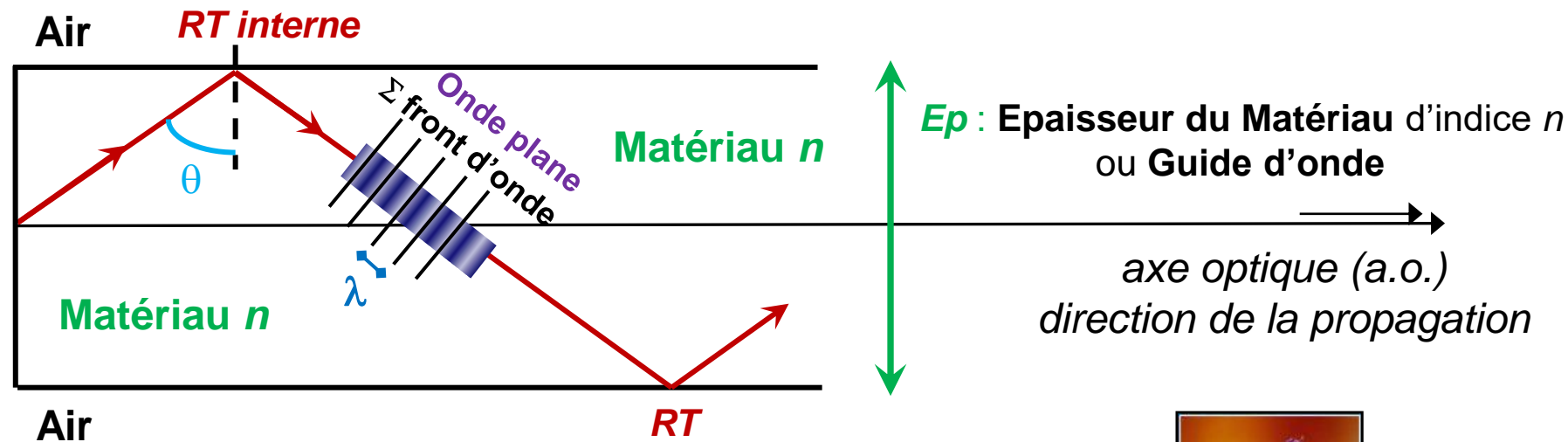
Onde plane, vague avec front d'onde Σ et longueur d'onde λ

3. La Lumière 'onde et rayon' guidée : vision zig-zag-zig...

- Années 1970, S.E. Miller
'Naissance de l'optique/photonique intégrée'
Début des puces intégrées pour travailler avec la lumière (émettre/transmettre/détecter)

- Schéma : propagation par réflexions totales (RT) successives (ou zig/zag).

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



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

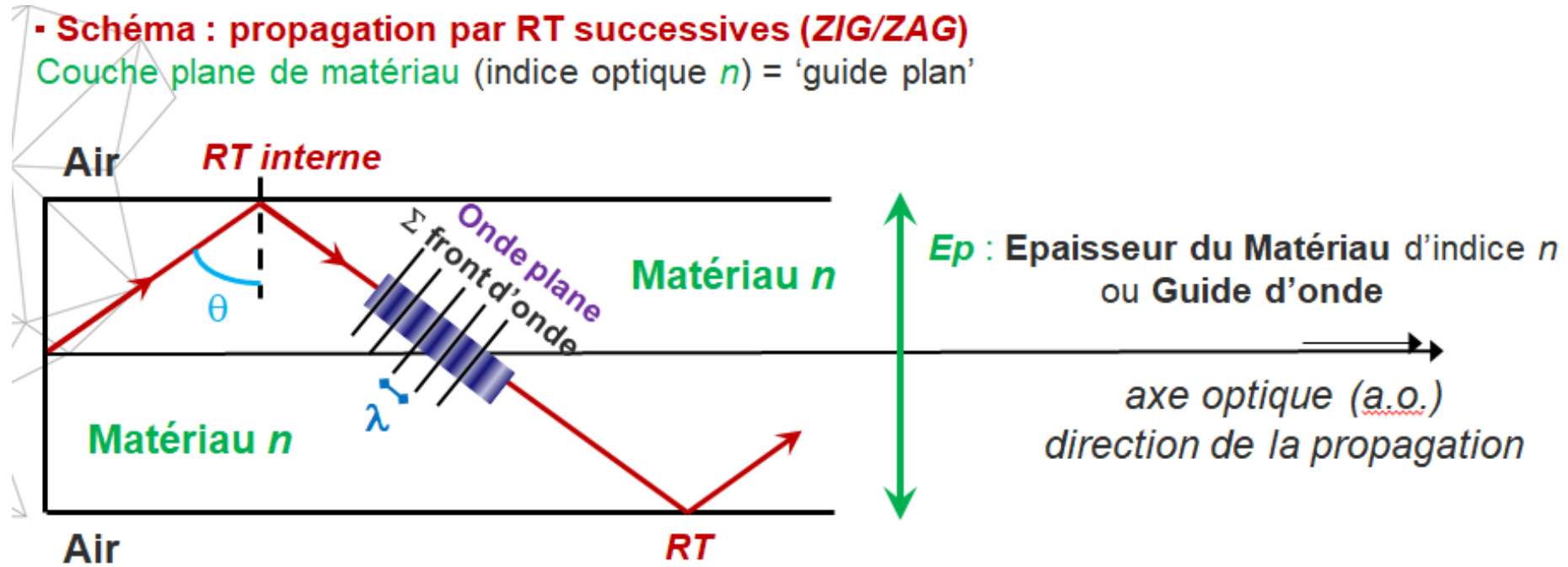
Integrated Optics: An Introduction

By STEWART E. MILLER

(Manuscript received January 29, 1969)



3. La Lumière 'onde et rayon' guidée: la quantification de la lumière



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

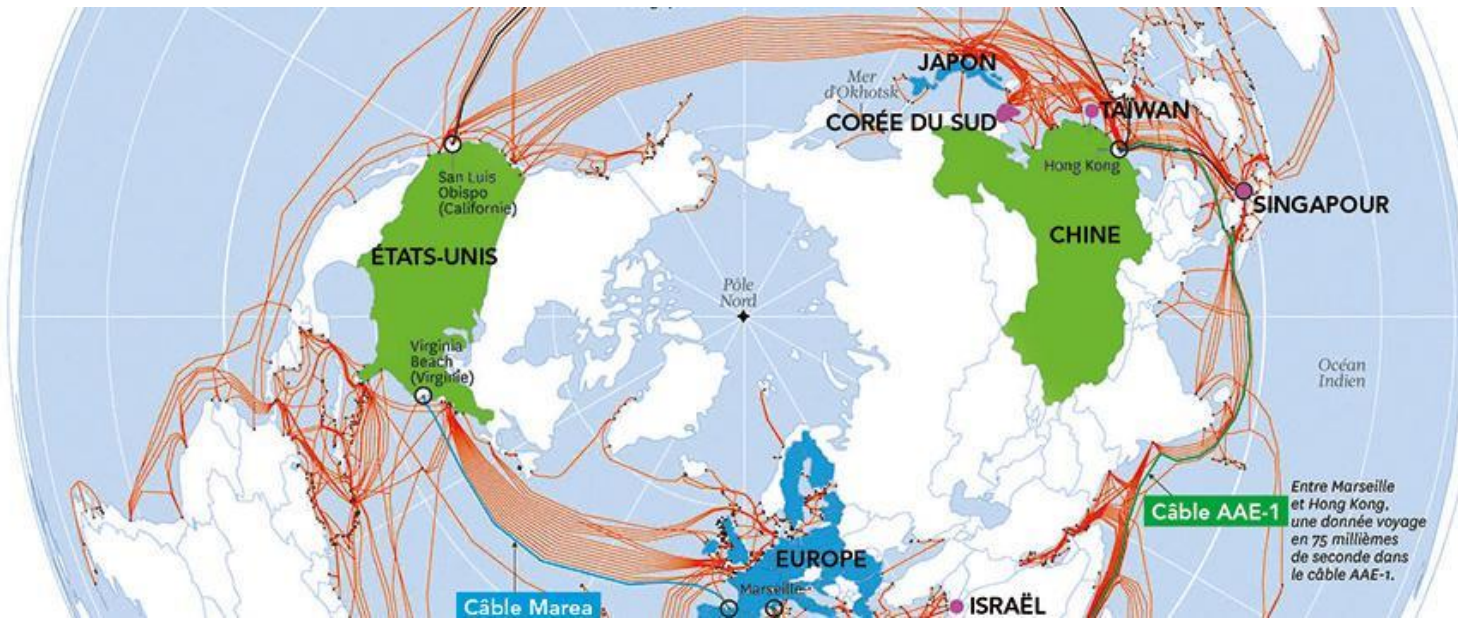
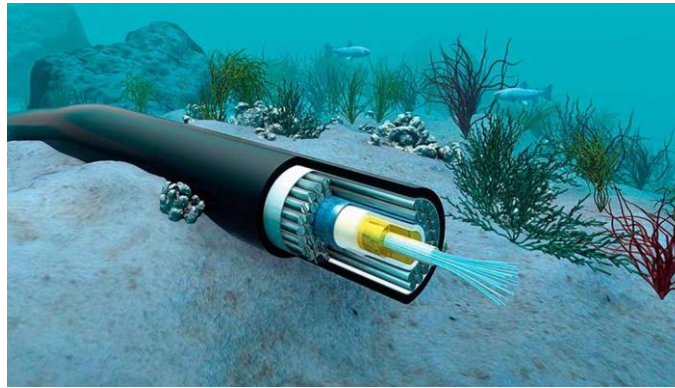
$$\cos \theta_{(m)} = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot E_p \cdot n}$$

(simplification $\varphi_r=0$)

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 !

3. La Lumière 'onde et rayon' guidée: la quantification de la lumière

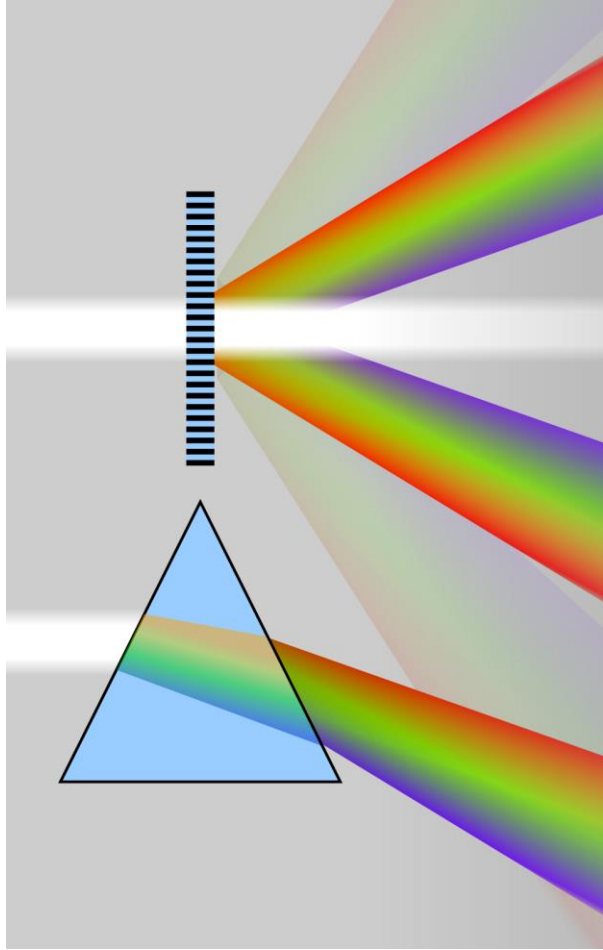
Fibres optiques



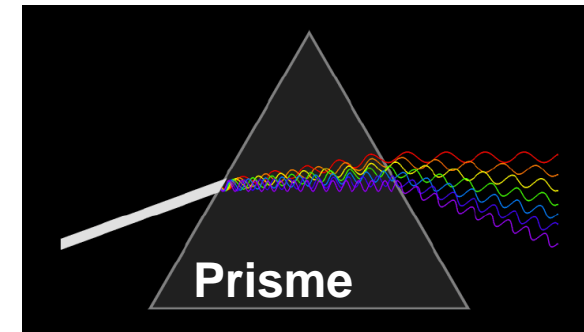
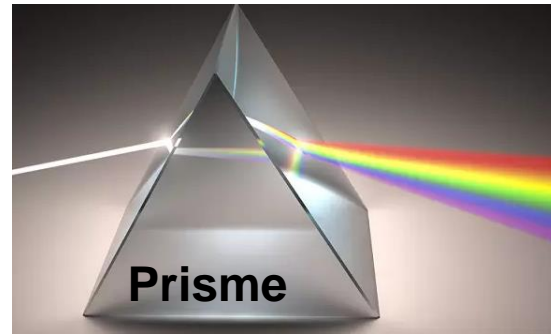
1,500,000 kilometers of cables laid on ocean floors (i.e.> 36 times around the Earth)

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

4. La Lumière *décomposée*: dispositifs analyseurs spectraux



Photographie d'un spectromètre



violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge

Interlude Historique : La Lumière « que de chemin parcouru »

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



$$\lambda \cdot f = c$$

$$h \cdot f = E$$



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

Ondulatoire

~1900

Corpuscule
Photon

Cordée : Séances travail TP 'Optique géométrique et ondulatoire'

« Les lycéen.ne.s accueillent les collégiens »



LYCÉE FULGENCE BIENVENUE. Des « Cordées de la réussite » pour les collégiens

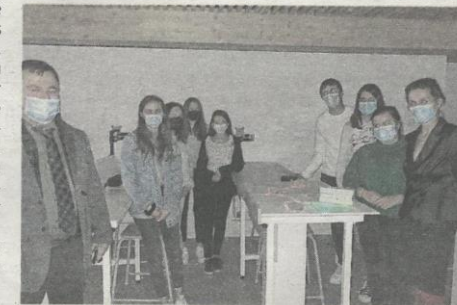
Les élèves du collège étaient invités à participer à l'opération « Les Cordées de la Réussite », avec leurs aînés lycéens.

Cette rencontre informative s'inscrit dans le cadre de liaisons entre l'Université de Rennes 1, pôle physique, site de Beaulieu à Rennes où officie le professeur Bruno Bèche, chercheur, le lycée Fulgence Bienvenue et les collèges de Plémet et Guerlédan. L'idée est d'ouvrir les élèves du secteur à des études scientifiques longues et d'approcher le métier de chercheur.

Les élèves choisis au lycée suivent la spécialité physique-chimie.

Le thème directeur de cette « Cordée » était : « Comment peser une masse avec de la lumière ? », axe de recherche du Professeur Bruno Bèche.

Les défis proposés aux collégiens et animés par les ter-



Travail sur la lumière avec les collégiens et les lycéens.

minales tournent autour de différents aspects de la lumière : modification de la trajectoire de la lumière, dispersion de la lumière, spectres lumineux, in-

terférences lumineuses...alliant à la fois le ludique et un savoir parfois très pointu. L'aspect transmission d'un savoir est aussi un élément directeur de

cette Cordée.

Cyril Le Corre et Valérie Mesnet encadraient cette Cordée au lycée Bienvenue, avec un travail très important effectué par Cyril sur certains défis moins classiques.



Les collégiens découvrent la filière scientifique du Lycée.

Cordée : Séances travail TP 'Optique géométrique et ondulatoire'

Fascicule de
TPs et séries
d'ateliers/ défis

Cordée de la réussite
« Comment peser avec la lumière ? »
Livret collège : Découvrir les
propriétés de la lumière



« Newton » (parfois connu sous le nom de « Newton après Blake »), est une sculpture de 3,7 m de haut, œuvre de 1995 du sculpteur Eduardo Paolozzi. La grande sculpture en bronze est exposée sur un haut socle de la place devant la British Library à Londres.

« J'ai vu plus loin que les autres parce que je me suis juché sur les épaules de géants »
Isaac Newton, « Courrier à Robert Hooke. », HSP Digital Library, 5 février 1675.

UNIVERSITÉ DE
RENNES 1

 Université de Rennes

LYCÉE FULGENCE
BIENVENUE
LOUDÉAC

Sommaire

Atelier n°1 : Découvrir le phénomène d'interférencesp.3

Défi n°1 : Expliquer le phénomène d'interférences ★★★★★

Défi n°2 : Obtenir du silence en additionnant deux ondes sonores ★

Défi n°3 : Déterminer la longueur d'onde d'une onde ultrasonore ★★★★★

Défi n°4 : Obtenir de l'obscurité en superposant de la lumière ★

Atelier n°2 : Comment décomposer la lumière ?p.12

Défi n°1 : Reproduire l'expérience de Newton ★

Défi n°2 : Découvrir la particularité de la lumière émise par un laser ★

Défi n°3 : Analyser la lumière émise par une lampe à inoandrogenoe et par une lampe à gaz ★

Défi n°4 : Identifier des éléments chimiques à partir de leur spectre d'émission ★★

Atelier n°3 : Comment fabriquer un détecteur de lumière ? ∞p.18

Défi n°1 : Mesurer une tension avec un microcontrôleur Arduino ★★

Défi n°2 : Etudier la photorésistance ★

Défi n°3 : Réaliser le détecteur de lumière ★★★★★

Atelier n°4 : Comment guider la lumière ?p.24

Défi n°1 : Atteindre la cible ! (1) ★

Défi n°2 : Atteindre la cible ! (2) ★★

Défi n°3 : Expliquer le principe de la fibre optique ★★

Défi n°4 : Rendre un tube à essai invisible et faire réapparaître une pièce ★

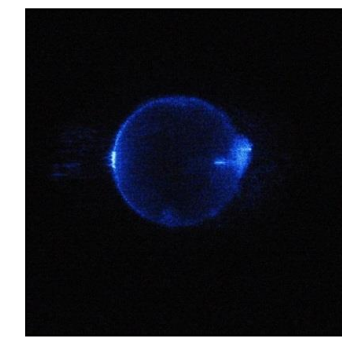
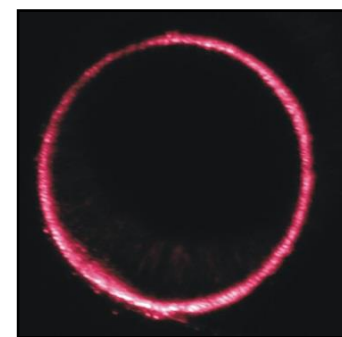
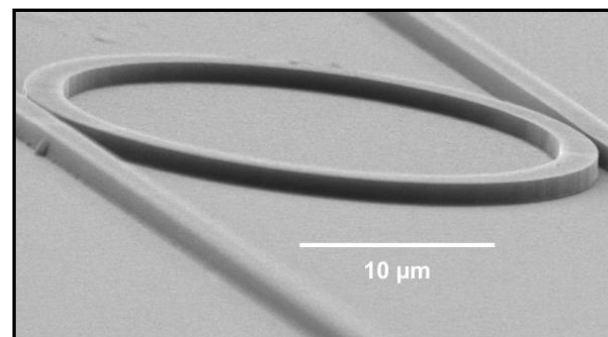
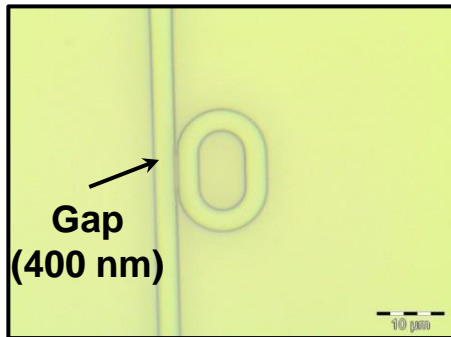
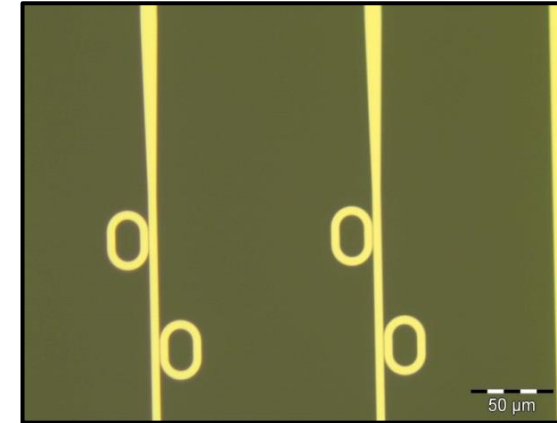
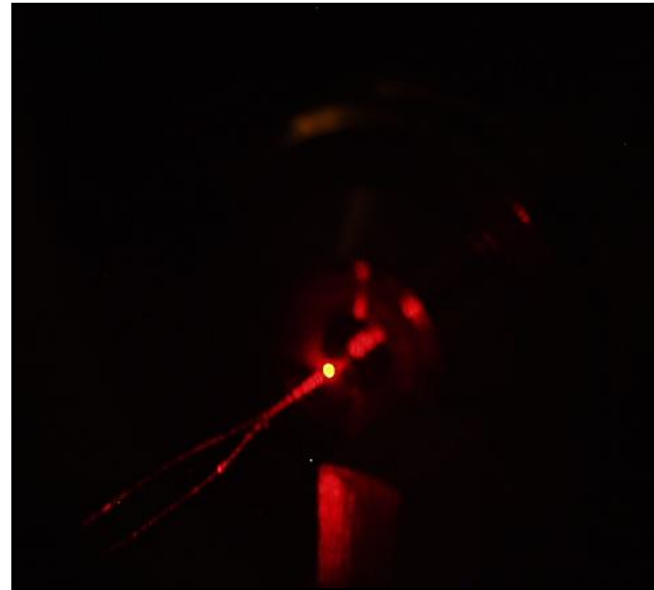
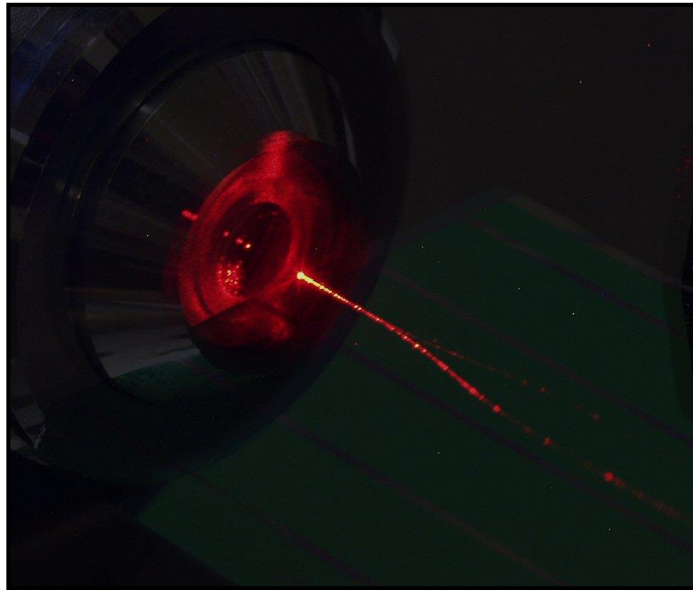
Annexe I : Spectres d'émissionp.29

Annexe II : Quelques dates dans l'histoire de l'optiquep.30

Annexe III : Utiliser une carte Arduino avec Ardublock ∞p.31

Annexe IV : Construire un spectroscopie à réseau de diffractionp.35

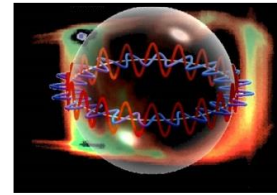
5. Nanotechnologies : la Lumière résonante, rebouclée et quantifiée



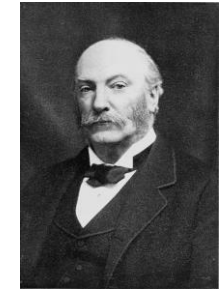
Interlude “acoustic analogy” : The resonant waves or Whispering Gallery Modes

Artist’s view of the phenomenon

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



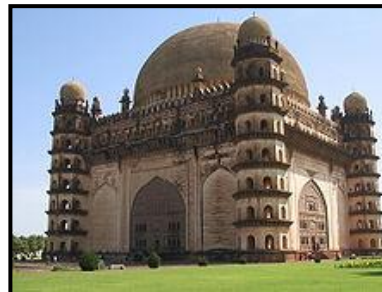
- At the origin, discover in *acoustic* (Lord Rayleigh → theory in 1910-1914)
- Type of waves which can propagate along the concave surface (grazing reflection) + ‘tuning’ if cycle ! *Notion of resonance*.



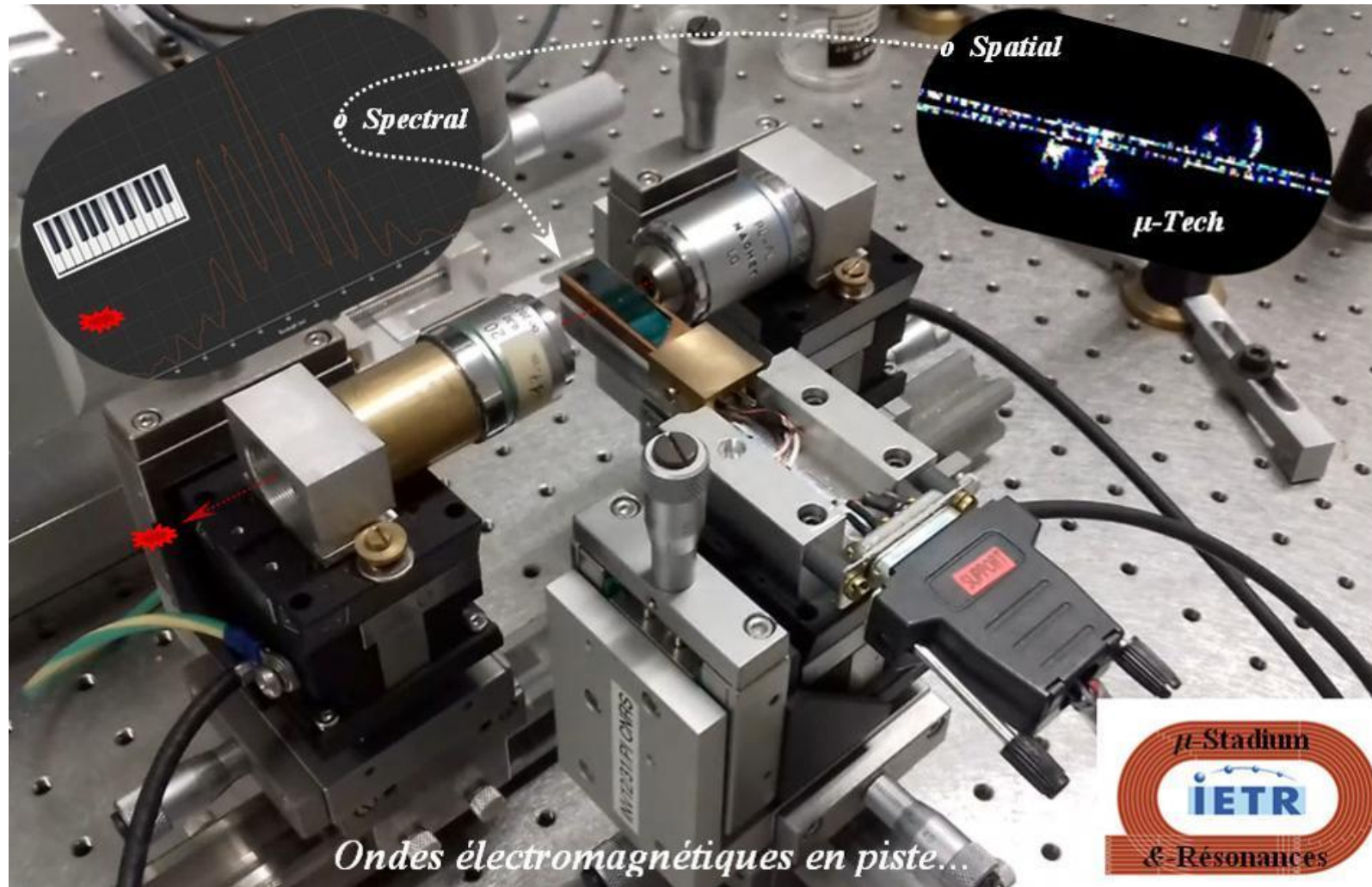
St Paul Cathedral - London
United Kingdom



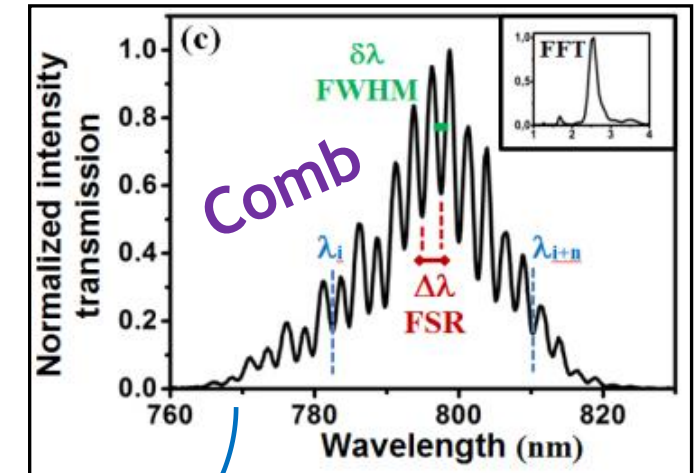
Gol Gumbaz - Bijapur
India



5. Nanotechnologies : la Lumière résonante, rebouclée et quantifiée



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 example I : 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 Garnier¹, Hervé Lhermite², Véronique Vié¹, Octave Pin³,
Quentin Liddell³, Hervé Cormerais^{2,3}, Etienne Gaviot⁴
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

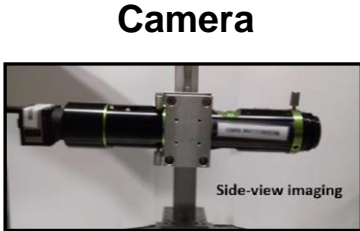
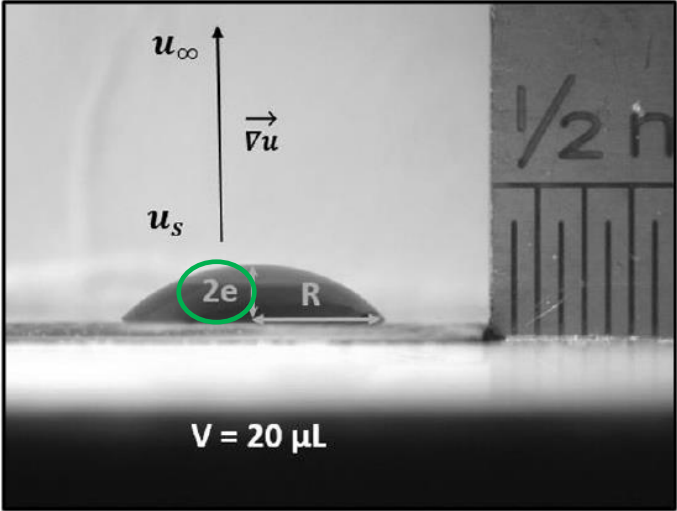
³ Centrale/Supelec, Campus de Rennes, F-35510 Cesson-Sévigné, France

⁴ Université du Maine, CNRS (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine—UMR 6613, F-72000 Le Mans, France

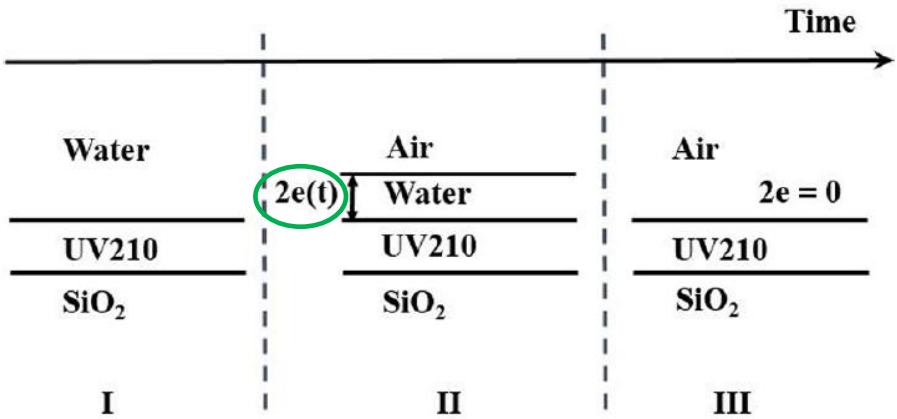
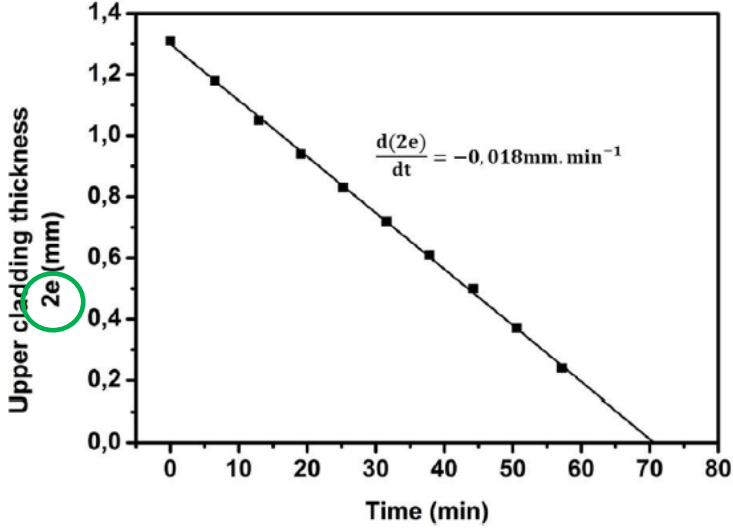
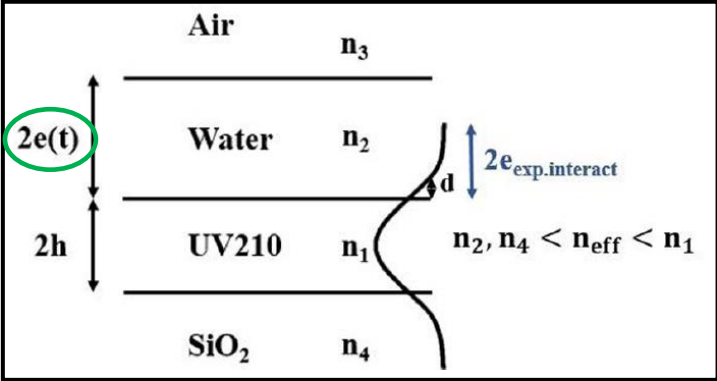
Study example I :

Imaging the evaporation mechanism

Water droplet evaporation



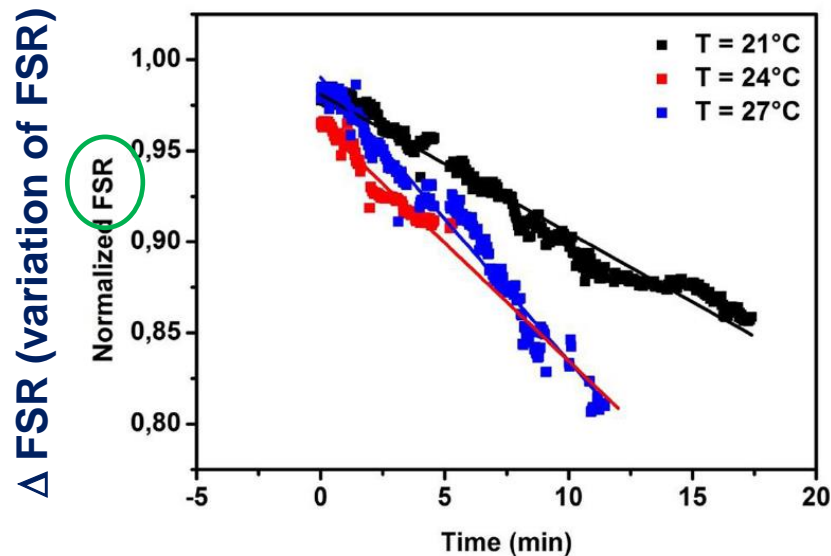
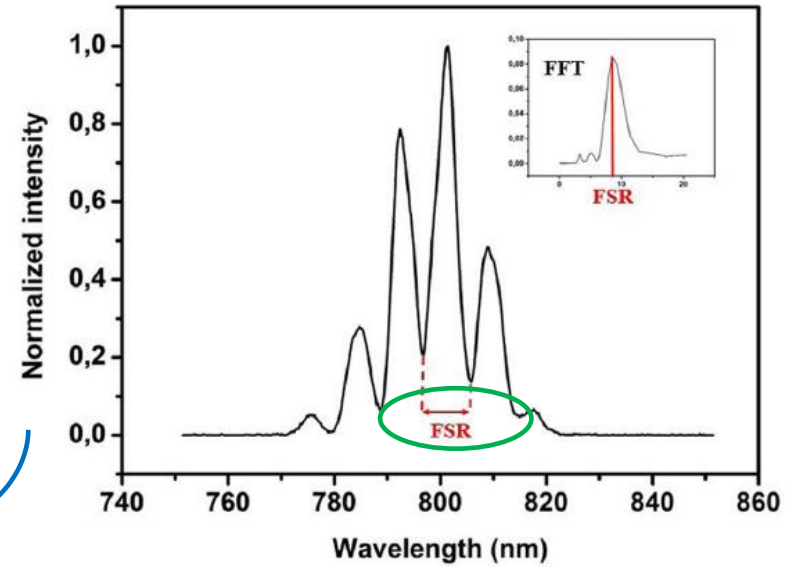
Evaporation mechanism



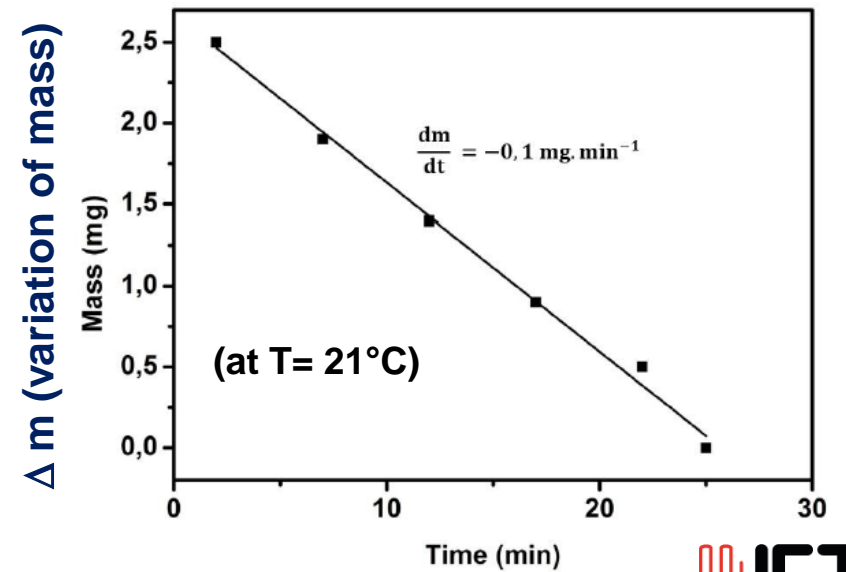
Study example I :

Correlated optical resonant signal

Spectral quantification
Comb's color



Corresponding Δm_{water} evaporated



Study example II : Applications to sedimentation rate measurements => $t_{\text{sedimentation}}$ Mass addition under resonant signal

(19) **United States**
 (12) **Patent Application Publication** (10) **Pub. No.:** US 2020/0363307 A1
BECHE et al. (43) **Pub. Date:** Nov. 19, 2020

(54) **METHOD FOR DETERMINING A SEDIMENTATION OR CREAMING RATE** (30) **Foreign Application Priority Data**
 Feb. 2, 2018 (FR) 1800110

(71) Applicants: **UNIVERSITE DE RENNES 1**,
 Rennes (FR); **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)**, Paris (FR)

(72) Inventors: **Bruno BECHE**, Rennes (FR); **Hervé LHERMITE**, Cesson Sevigne (FR); **Véronique VIE**, Rennes (FR); **Lucas GARNIER**, Rennes (FR)

(73) Assignees: **UNIVERSITE DE RENNES 1**,
 Rennes (FR); **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)**, Paris (FR)

(21) Appl. No.: **16/966,416**

(22) PCT Filed: **Jan. 17, 2019**

(86) PCT No.: **PCT/EP2019/051103**

§ 371 (c)(1),

(2) Date: **Jul. 30, 2020**

Publication Classification
 (51) **Int. Cl.**
G01N 15/05 (2006.01)
 (52) **U.S. Cl.**
 CPC **G01N 15/05** (2013.01); **G01N 2015/055**
 (2013.01)

(57) **ABSTRACT**
 A method for determining a rate of sedimentation or of creaming of a mixture in suspension, including an application of a signal of the mixture in suspension to a photonic microresonator, an application of a first optical signal at the output of the photonic microresonator carrying the sample of the mixture in suspension, an acquisition and a recording of a second optical signal, delivered at the output of the microresonator carrying the sample of the mixture in suspension, and a determination of information representing a rate of sedimentation or of creaming of the mixture from the recorded second signal, by successive iterations of spectral analysis of the second optical signal.

Patent



On the detection of nanoparticle cloud migration by a resonant photonic surface signal towards sedimentation velocity measurements

L. Garnier^a, J. Gastebois^a, H. Lhermite^a, V. Vié^b, A. Saint-Jalmes^b, H. Cormerais^{a,c}, E. Gaviot^d, B. Bêche^{a,*}

^a Univ Rennes, CNRS, IETR (Institut d'Electronique et de Technologies numériques) – UMR 6164, F-35000 Rennes, France
^b Univ Rennes, CNRS, IPR (Institut de Physique de Rennes) – UMR 6251, F-35000 Rennes, France
^c Centrale/Supélec, Campus de Rennes, F-35510 Cesson-Sévigné, France
^d Le Mans Université, CNRS, LAUM (Laboratoire d'Acoustique) – UMR 6613, F-72000, France

ARTICLE INFO

Keywords:
 Nanoparticle migration
 Fragmented material
 Sedimentation rate
 Integrated photonic devices
 Surface resonant signal
 Real time signal processing
 Optoelectronic detection

ABSTRACT

Migration and sedimentation of solid particles in a liquid are physical phenomena involving accumulation of soft matter or decantation of fragmented matter. A thorough understanding together with relevant measurements are prerequisites regarding many fields, including medicine, galenic pharmacology, food processing, and the cosmetics industry. In this paper, we investigate the feasibility of monitoring and detecting the migration of a nanoparticle cloud with a resonant light probe. For this purpose, hybrid silicon/silica/UV210 organic integrated photonic racetrack resonators were patterned by thin film processes to be used as sensors measuring the outcome of the impact of a cloud of nanoparticles, the dynamic migration plus sedimentation phenomenon of the nanoparticle cloud in water. A broadband superluminescent diode has been used for the excitation. Then, the spectral characteristics of the resonant guided modes have been analyzed, considering the observed changes while tracking the free spectral range of the transduced comb spectra as a function of time. The way to operate can be summarized as follows: Solutions based on spherical silica nanoparticles of fixed size are prepared and subjected to rheological measurements to obtain their respective viscosities. Next, a millimeter tank filled with water is conveniently placed on the active surface of the sensing chip, prior to the addition of one of the previously mentioned solutions. The series of spectra are acquired during the whole migration sequence and the transduced optical signal is then directly processed and treated by a specific code operated in real time by way of Lagrange interpolation polynomials. Collected data are then compared to a simple theoretical model describing the sedimentation of a spherical particle in water (Stokes' law). Eventually, the implementation of the device in a characterization platform and the development of a specific protocol allows a global treatment, whose description is followed by discussions on measurements and data. Consequently, after the impact of the drop containing the nanoparticles, the monitoring of a first phase regarding their fast cloud migration into the global study volume (with flow of matter plus vortex) eventually followed by their slow sedimentation, can be detected using such a resonant light probe. The overall duration of the first phase associated with sedimentation velocities is in the order of a few tens of $\mu\text{m}/\text{min}$ for particles with submicron diameters (several hundreds of nanometers); a first attempt of comparison of this first phase with the results of the classic Stokes model would give a convergence of the values reaching between 9 and 19% for the sedimentation rates.

Study example II : Applications to sedimentation rate measurements => $t_{\text{sedimentation}}$ Mass addition under resonant signal

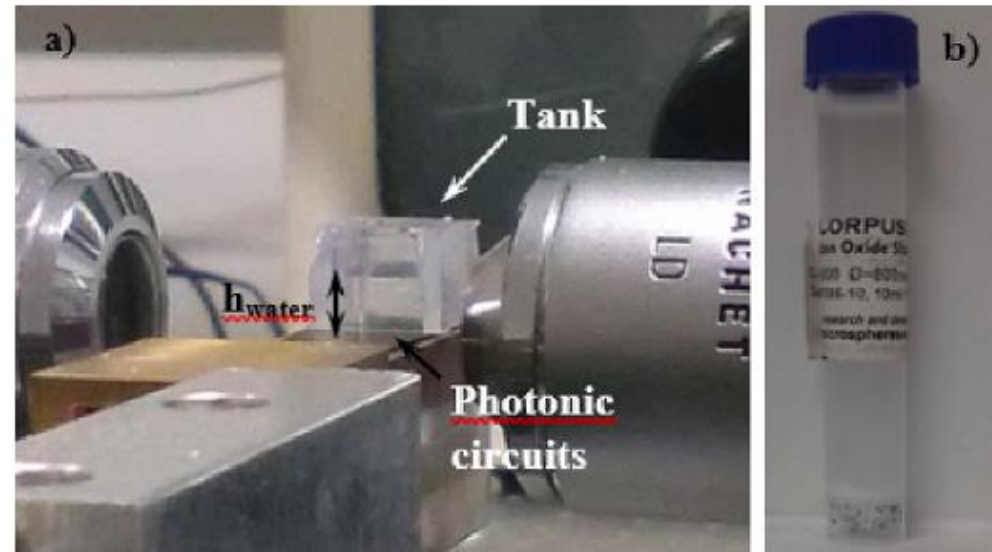
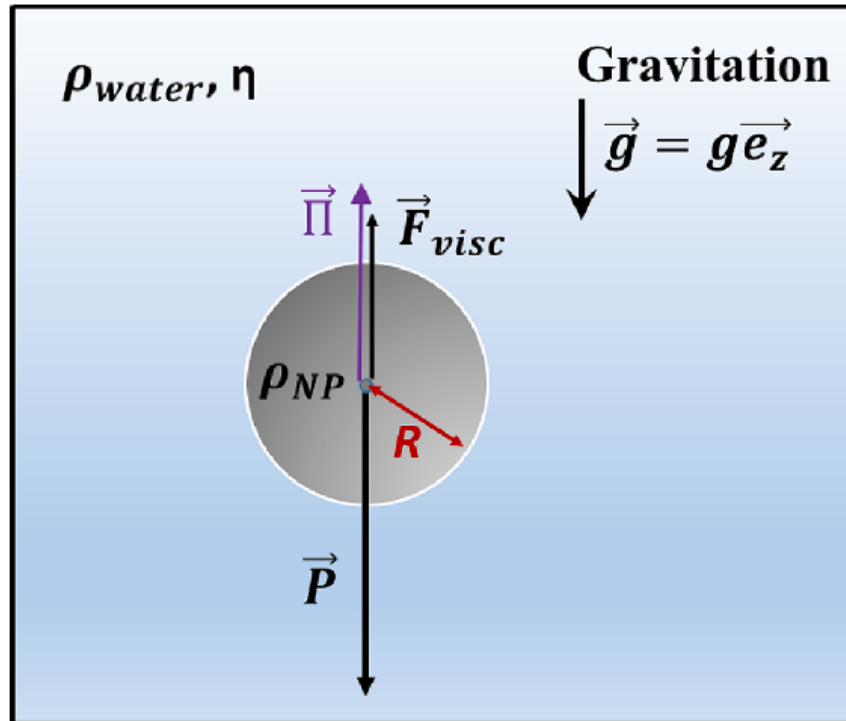
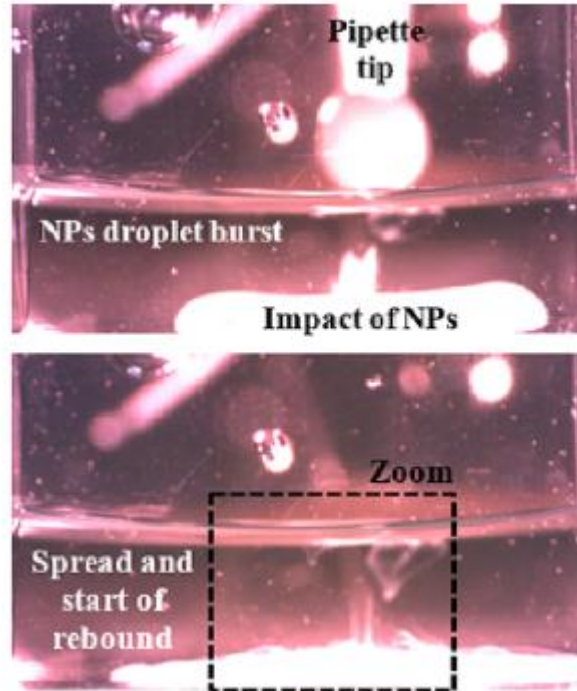
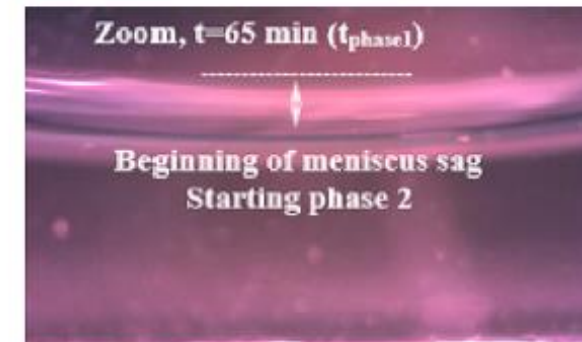
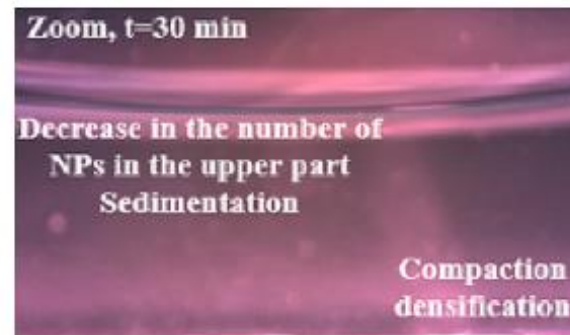
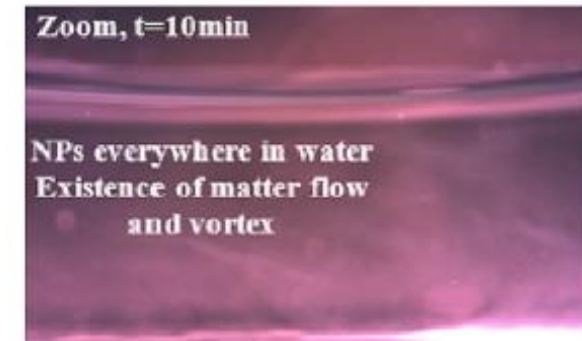
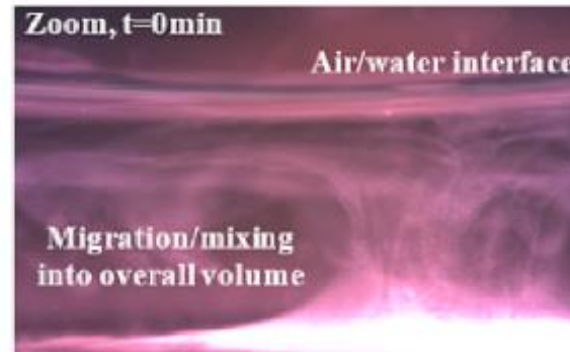


Fig. 1. Schematic representation of a spherical particle during sedimentation. The nano-particle (NP) of volumic mass ρ_{NP} and radius R immersed in a fluid of volumic mass ρ_{water} and dynamic viscosity η in a gravitational field \vec{g} , is subject to: its weight, the Archimede's force $\vec{\Pi}$, and the viscous friction force \vec{F}_{visc} . In the special case of spherical geometry of the particle, such a drag force is called the Stokes force.

Study example II : Applications to sedimentation rate measurements => $t_{\text{sedimentation}}$ Mass addition under resonant signal

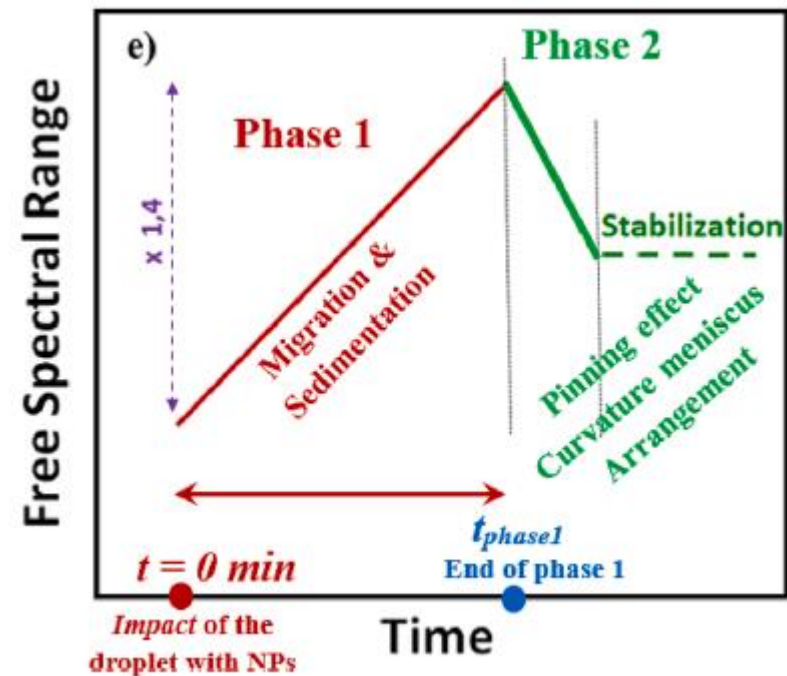
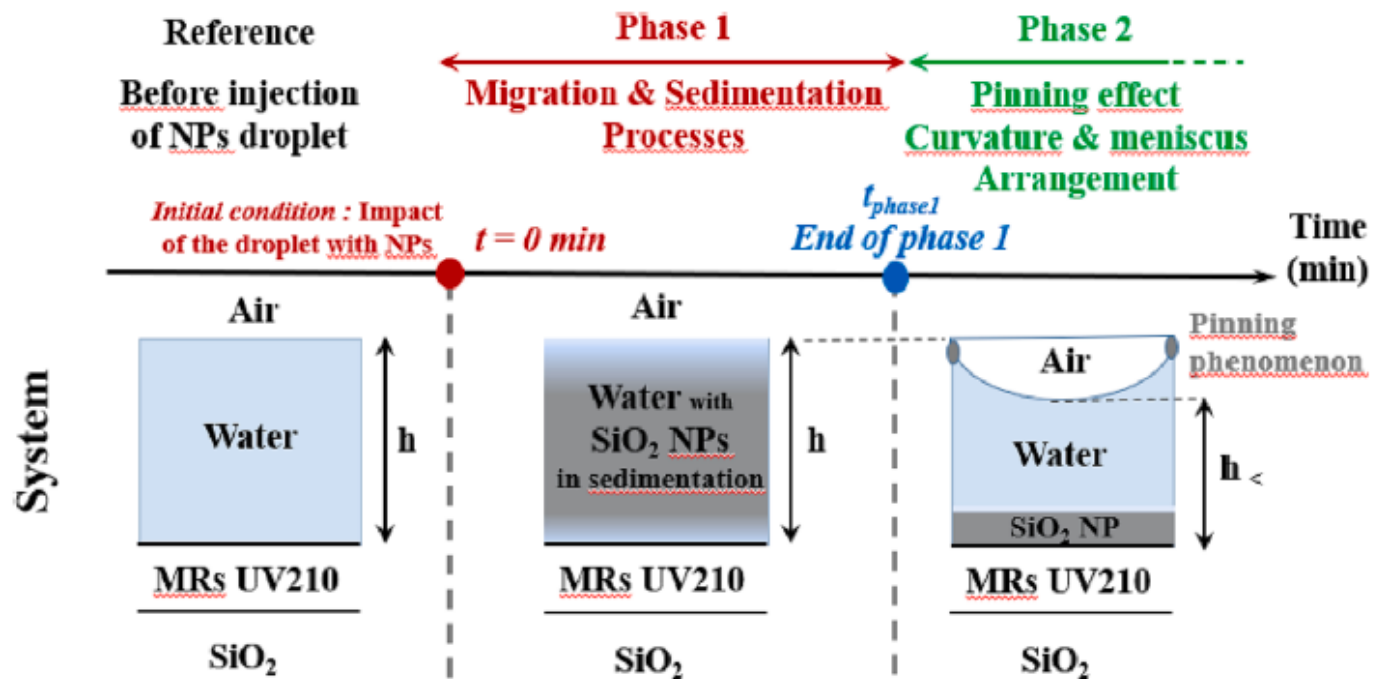


Phase 1 : Migration of NPs, flux and vortex, Marangoni effect, sedimentation



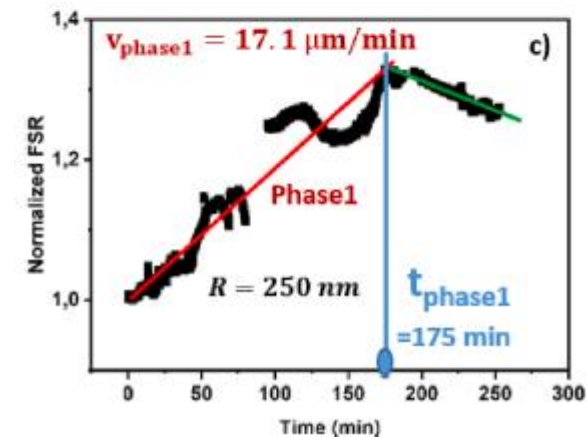
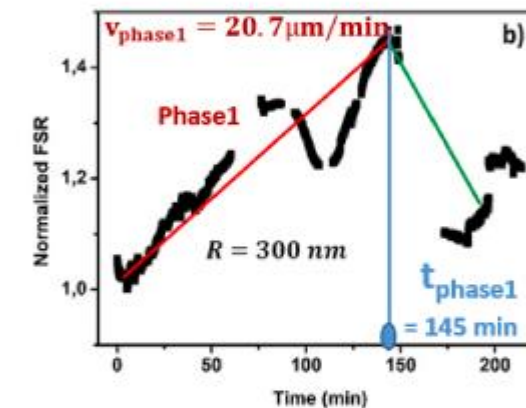
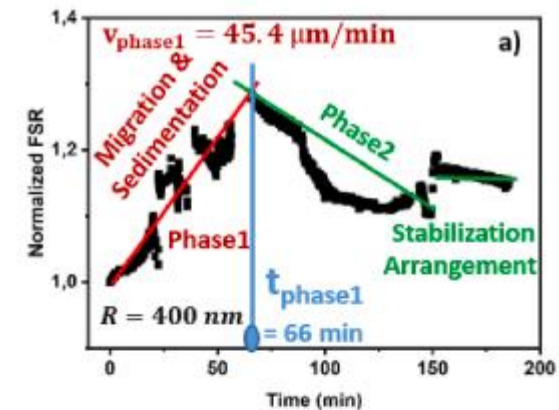
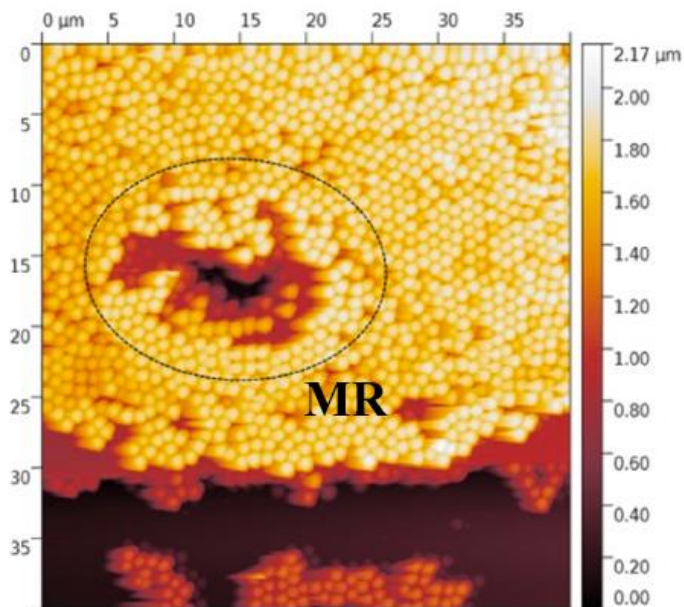
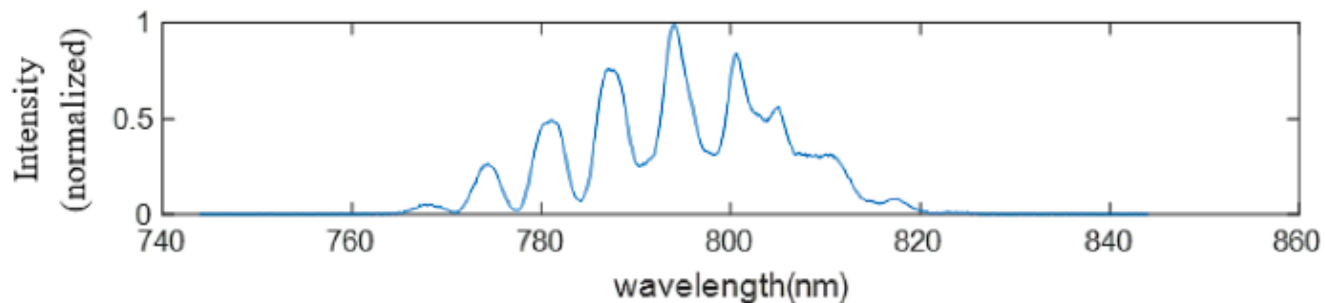
$t_{\text{sedimentation}}$ function of the size of NPs !

Study example II : Applications to sedimentation rate measurements => $t_{\text{sedimentation}}$ Mass addition under resonant signal



Study example II : Applications to sedimentation rate measurements

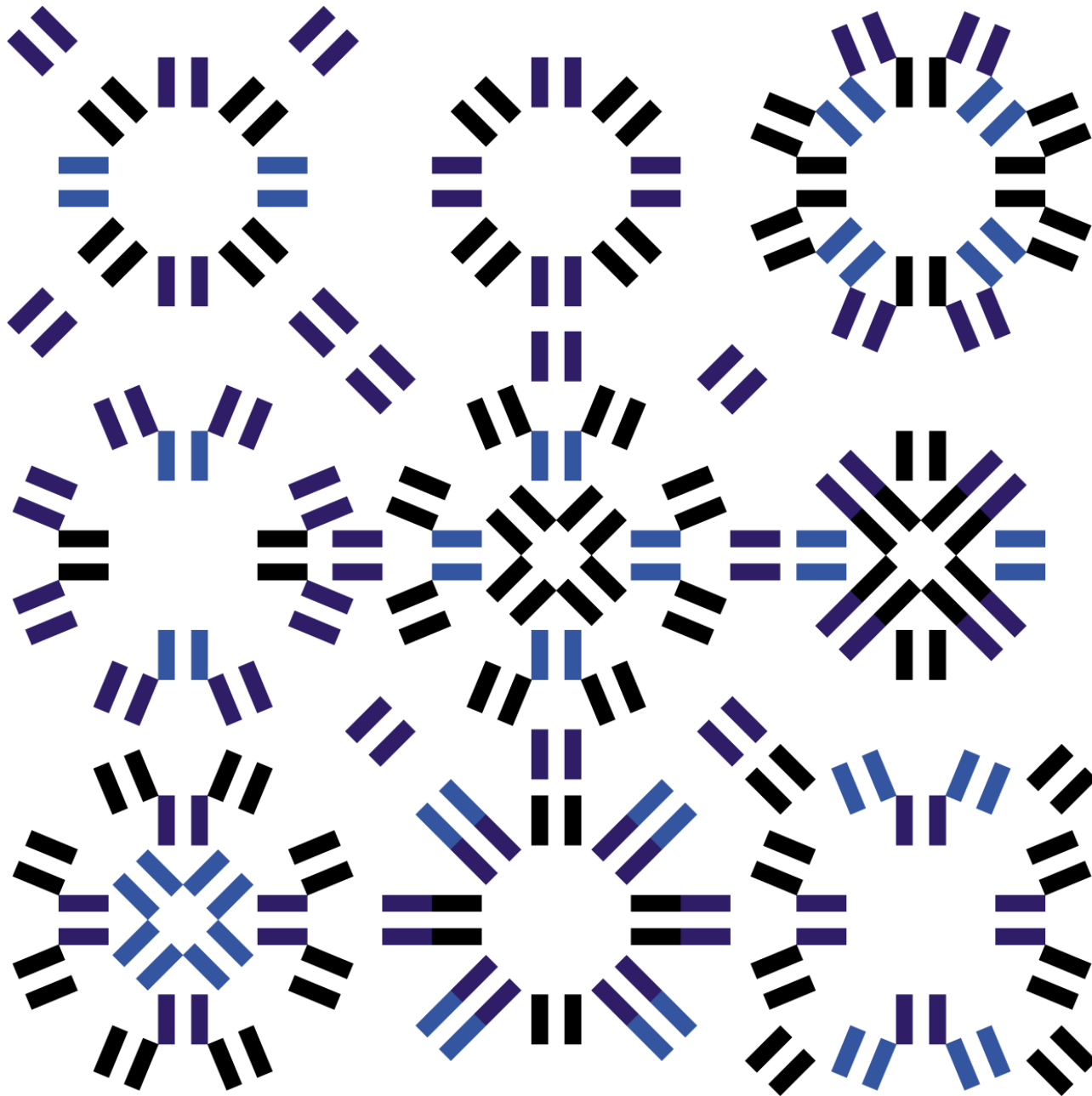
$\Rightarrow t_{\text{sedimentation}}$ Mass addition under resonant signal



Study example II : Applications to sedimentation rate measurements => $t_{\text{sedimentation}}$ Mass addition under resonant signal

Theoretical sedimentation speed values for silica nano-particles (NPs) with radius 250, 300 and 400 nm in water according to the Stokes model (with $\eta = 1$ mPa.s, $\Delta\rho = \rho_{\text{NP}} - \rho_{\text{water}} = 2650 - 1000 = 1650$ kg/m³ and $g = 9.81$ m/s²), compared to average experimental sedimentation rate values obtained by measurements on resonant surface light probes. The parameter h_{water} represents the water height into the tank and t_{phase1} the phase 1 duration given by the instant t_{phase1} as the FSR(t_{phase1}) reaches its maximum value before decreasing under the resonant surface probe (Fig. 8).

Dimensions of the Nano-Particles (nm)	R-radius	250	300	400
Sedimentation Velocity ($\mu\text{m}/\text{min}$)	V_{Stokes} <i>Theoretical with Stokes formula</i>	13.5	19.4	34.5
	$\bar{V}_{\text{phase1}} = h_{\text{water}} / t_{\text{phase1}}$ <i>Average of Experimental with various h_{water} (2 and 3 mm)</i>	15.5	17.5	42.8
	Relative difference (%)	12.9	9.7	19.3



ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the 'Direction de l'Innovation et des Relations avec les Entreprises' (DIRE) of the CNRS plus Rennes Metropolis for partly financially supporting this work plus the NanoRennes platform for DUV process (<https://www.ietr.fr/en/nr-nanoreennes-platform>).

This study is also a part of a PASS_programm 'Pour une Ambition Scolaire Scientifique' (For a Scientific School Ambition) with the Brittany center (Sir Cyril Le-Corre and Madame Valérie Mesnet at Lycée Fulgence Bienvenüe, and Collèges Louis Guilloux, Paul Eluard, Romain Rolland, <https://spm.univ-rennes1.fr/les-cordees-de-la-reussite>). ✓

Thank you for your attention

A suivre : Présentation de l'Université de Rennes et de son offre de formation scientifique : portails en science, prépa intégrée cupge et écoles, BUT...