

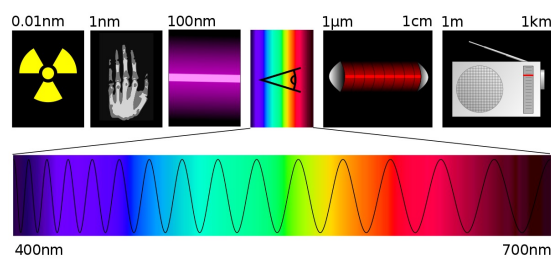
# Diffusion des rayonnements



**François-Xavier LEGRAND**  
Maître de Conférences des Universités  
Université Paris-Saclay  
francois-xavier.legrand@universite-paris-saclay.fr

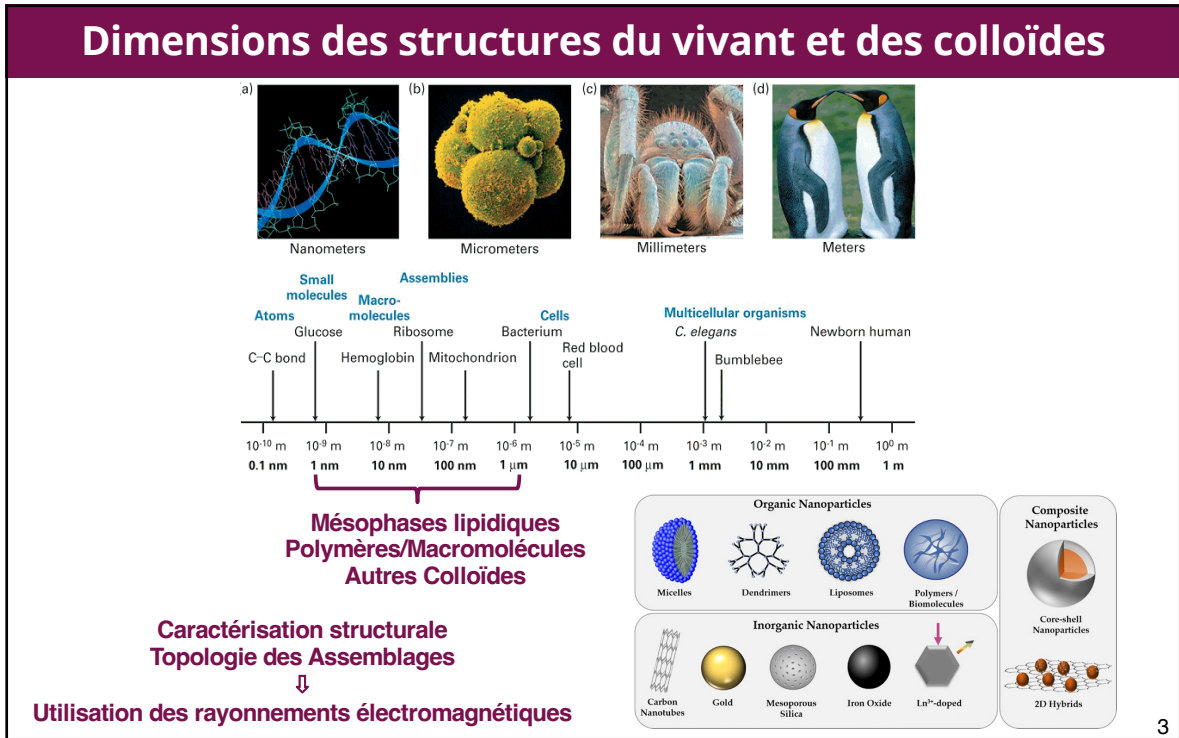
1

# 1/ Introduction aux rayonnements électromagnétiques

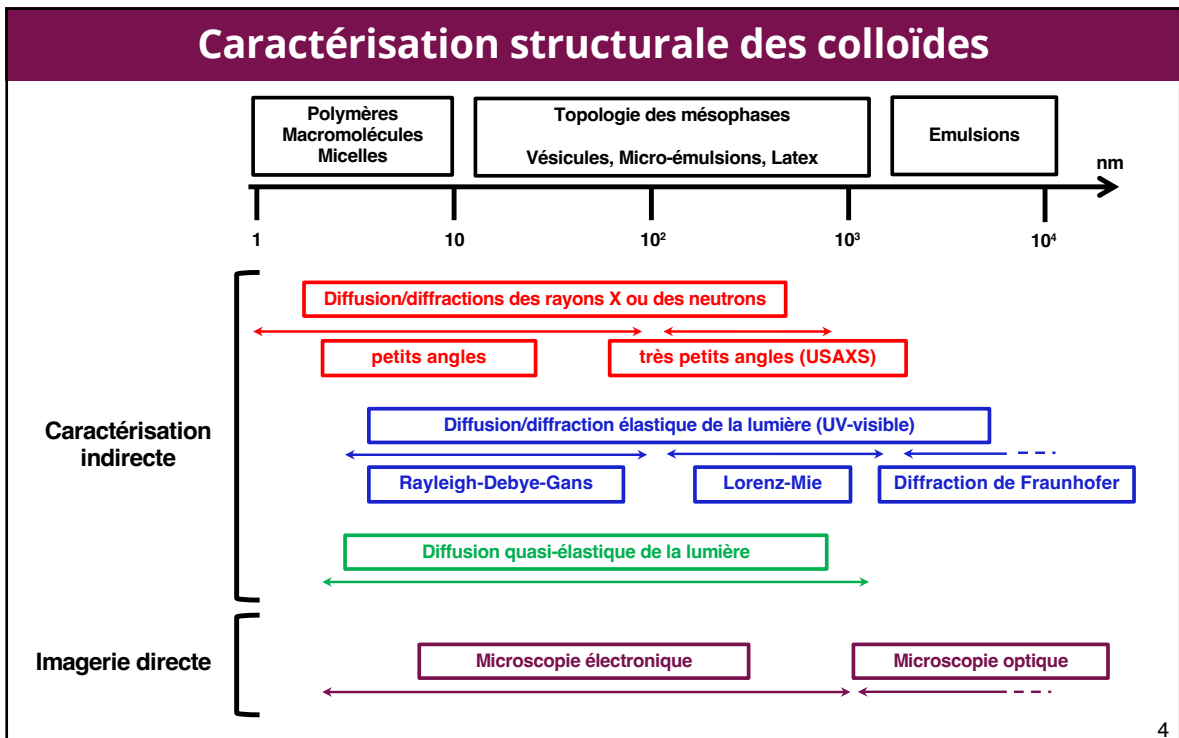


2

2

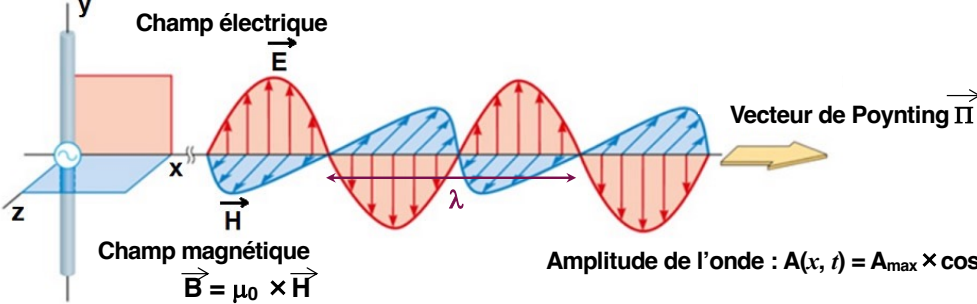


3



4

## Caractéristiques d'un rayonnement électromagnétique



Champ électrique  $\vec{E}$

Champ magnétique  $\vec{B} = \mu_0 \times \vec{H}$

Vecteur de Poynting  $\vec{\Pi}$

Amplitude de l'onde :  $A(x, t) = A_{\max} \times \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{V}\right) + \phi_0\right)$

- ⇒ Pulsation  $\omega = 2\pi\nu$
- ⇒ Fréquence  $\nu$
- ⇒ Vitesse de propagation  $V$
- ⇒ Phase à l'origine  $\phi_0$

⇒ Longueur d'onde  $\lambda$  (m)

⇒ Fréquence  $\nu$  ( $s^{-1} = \text{Hz}$ )

Constante pour un rayonnement donné

⇒ Vitesse de propagation de l'onde  $V$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) :  $\lambda = \frac{V}{\nu}$

dans le vide :  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$  avec  $c$  célérité (vitesse) de la lumière dans le vide  $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot s^{-1}$

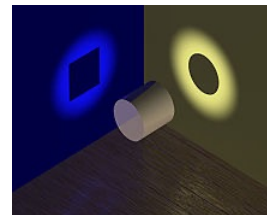
⇒ Indice de réfraction  $n$  (sans unité) :  $V = \frac{c}{n}$

$n$  est fonction de la nature du matériau et dépend de la fréquence de l'onde

5

## Théorie quantique

- 1900 Max Planck : hypothèse quantum d'énergie
- 1900 Albert Einstein : effet photoélectrique
- 1924 Mise en évidence expérimentale des photons
- 1926 Louis de Broglie : dualité onde-corpuscule



⇒ Théorie quantique : pour expliquer certaines propriétés des ondes électromagnétiques (effet Compton, effet photoélectrique, absorption, émission, ...), il est nécessaire de les assimiler à un flux de particules ou corpuscules dont l'énergie (quantum d'énergie) est proportionnelle à la fréquence de l'onde.

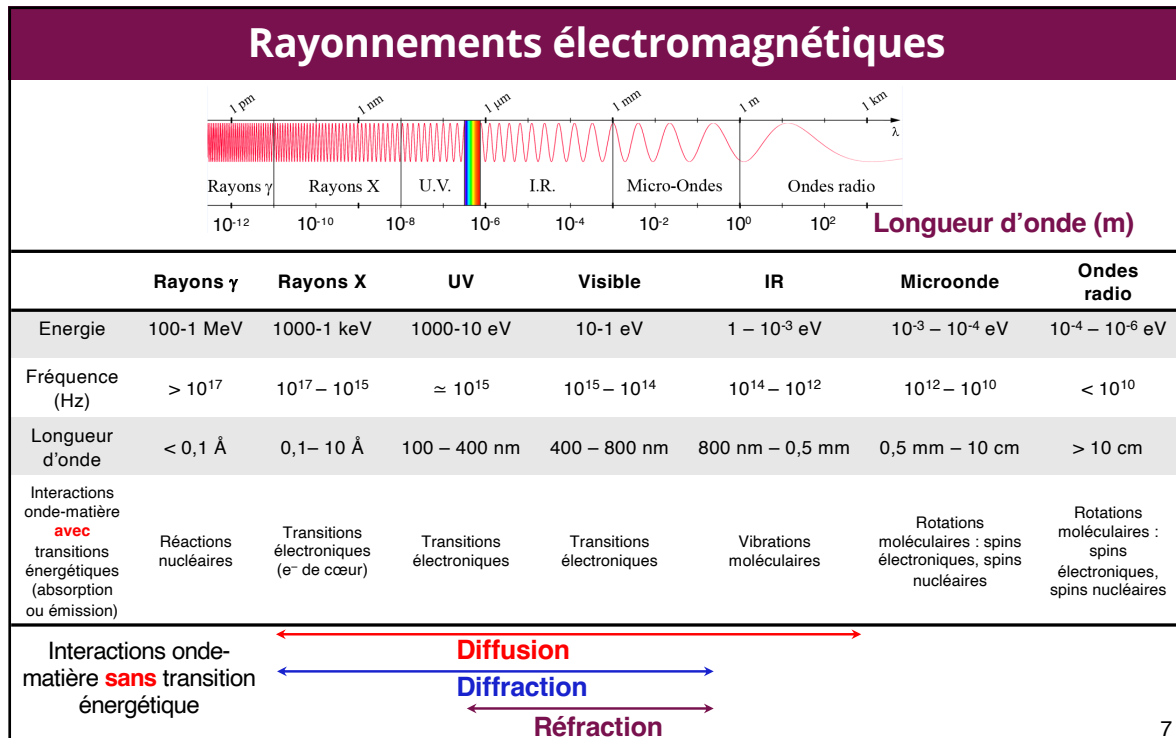
$$\Delta E \text{ (J)} = h\nu \quad \text{avec } h \text{ la constante de Planck : } h = 6,62620 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\text{or } \nu = \frac{c}{\lambda_0} \quad \text{donc } \Delta E = h \times \frac{c}{\lambda_0}$$

⇒ La lumière correspond à des **PHOTONS** (quanta de lumière), corpuscules en déplacement, d'énergie  $h\nu$  et de masse nulle.

6

6



7

## Interactions rayonnement électromagnétique – matière

champ électrique oscillant  
 ⇒ Force électrique

champ magnétique oscillant  
 ⇒ Force magnétique

**Electrons de la matière**  
**Phénomènes photoélectriques**

- ① Les photons « rebondissent » sans changement d'énergie  
 ⇒ Diffusion
- ② Les photons « rebondissent » en perdant de l'énergie (changement de  $\lambda$ )  
 ⇒ Effet Compton : éjection d'un électron faiblement lié (périphérique)
- ③ Les photons sont absorbés lors d'une transition électronique  
 ⇒ Absorption UV-visible : changement d'orbite de l'électron  
 ⇒ Fluorescence : Ionisation transitoire et émission d'un photon  
 ⇒ Effet Auger : Ionisation et émission d'un électron
- ④ Les photons sont absorbés avec perturbation moléculaire  
 ⇒ Absorption IR : Vibration moléculaire – électrons de liaisons  
 ⇒ Absorption micro-ondes/ondes radio : Mouvement moléculaire

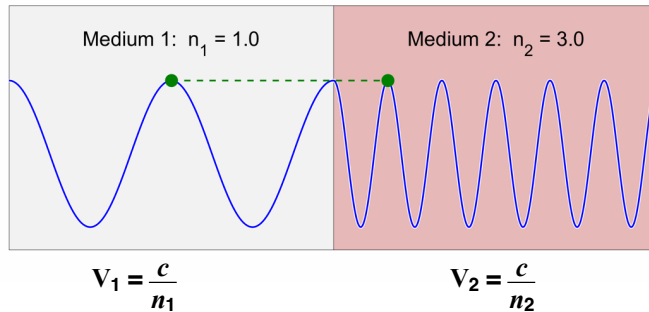
8

## Indice de réfraction

Dans un matériau d'indice de réfraction  $n$ , la vitesse de l'onde est donnée par  $V = \frac{c}{n}$

⇒ L'indice de réfraction  $n$  est fonction du matériau et dépend de la fréquence  $\nu$  de l'onde

⇒ Dans le vide :  $n = 1$  ( $V = c$ )



$$\lambda_1 = \frac{V_1}{\nu} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\nu} = \frac{c}{\nu n_1} = \frac{\lambda_0}{n_1}$$

avec  $\lambda_0$  longueur d'onde dans le vide

Onde de fréquence fixe  $\nu$  traverse deux milieux distincts par leur densité :

**1 moins dense que 2**

⇒ La vitesse :

**$V_1 > V_2$  : l'onde va plus vite dans 1**

⇒ La longueur d'onde :

**$\lambda_1 > \lambda_2$  : la longueur d'onde est plus grande dans 1**

9

9

## Indice de réfraction

⇒ L'indice de réfraction  $n$  est fonction de la nature du matériau :

$$n = \sqrt{\mu_r \times \epsilon_r}$$

avec  $\mu_r$  la perméabilité magnétique du vide  $\frac{\mu}{\mu_0}$   $\mu_0$  dans le vide

$\epsilon_r$  la permittivité électrique du vide  $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$   $\epsilon_0$  dans le vide

$$\Rightarrow n = 1$$

L'indice de réfraction est relié à la polarisabilité  $\alpha$  du matériau :

Moment des charges induit par le champ local  $\vec{E}$  de l'onde :  $\vec{m} = \alpha \times \vec{E}$

⇒ Equation de Lorenz-Lorentz :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = \frac{N \times \alpha}{3\epsilon_0} \quad \text{avec } N \text{ nombre de molécules par unité de volume}$$

$\epsilon_0$  permittivité du vide

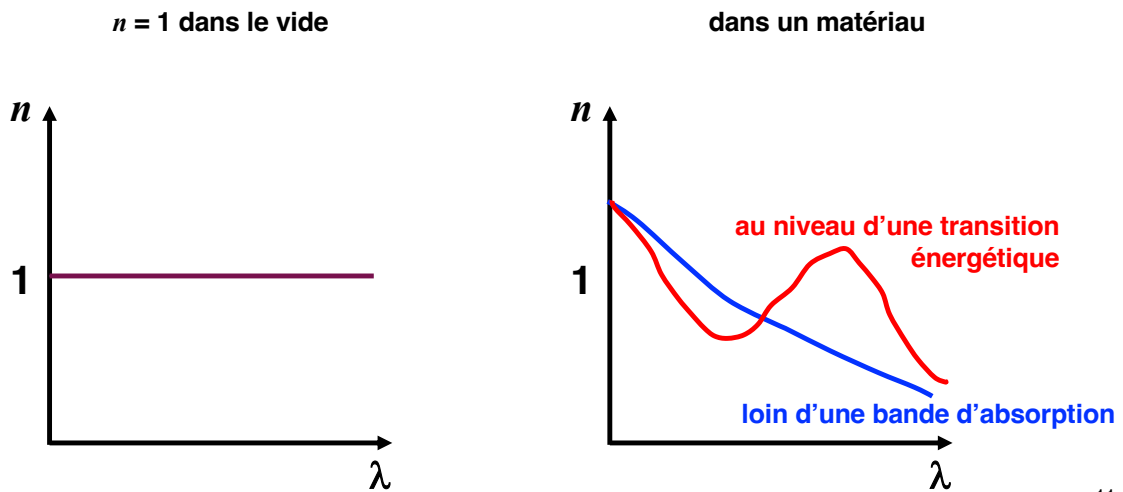
10

10

## Indice de réfraction

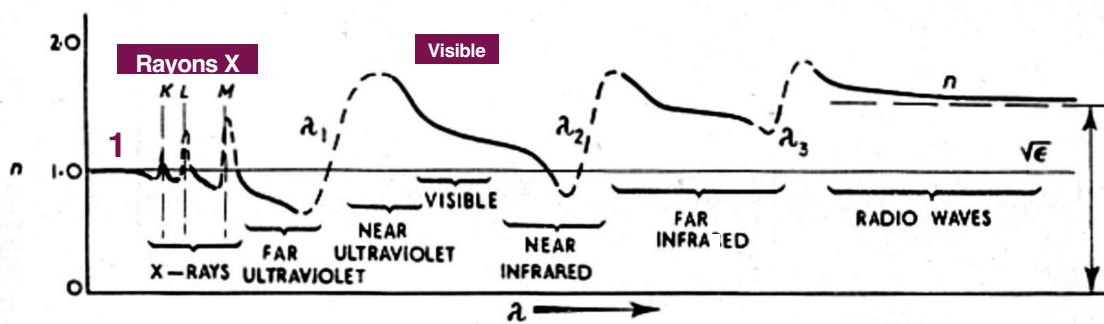
L'indice de réfraction  $n$  est fonction de la fréquence de l'onde  $\nu$ .

La variation d'indice  $n$  en fonction de la fréquence  $\nu$  dépend des interactions onde-matière



11

## Dispersion de l'indice de réfraction du verre

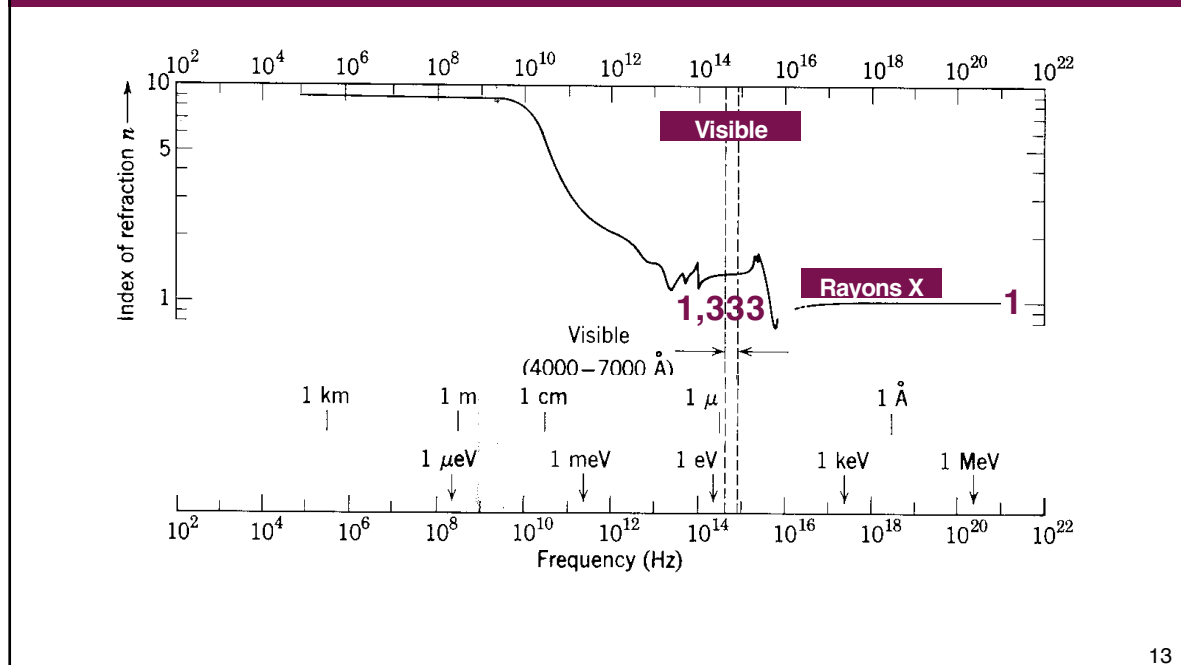


1

12

12

## Dispersion de l'indice de réfraction de l'eau



13

## Indice de réfraction

Cas des ondes de fréquences élevées (exemple : rayons X) et loin d'une bande d'absorption

- ⇔ fréquence très grande
- ⇔ longueur d'onde très courte

$$n = 1 - \delta = 1 - \frac{\lambda^2 \times N_A \times r_e \times Z \times \rho}{2\pi \times A}$$

- Avec
- $\delta$  : « Refractive index decrement »
  - $\lambda$  : longueur d'onde du rayonnement
  - $N_A$  : nombre d'Avogadro ( $6,02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )
  - $r_e$  : rayon classique de l'électron ( $2,8179 \times 10^{-15} \text{ m}$ )
  - $Z$  : numéro atomique de l'élément
  - $A$  : nombre de masse de l'élément
  - $\rho$  : masse volumique du matériau

14

14

### Lois de Snell-Descartes

**Réflexion**  
 $|\theta_1| = |\theta_r|$

En incidence normale ( $\theta_1 = 0$ )  

$$\frac{I_{\text{réfléchi}}}{I_{\text{incident}}} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$$

**Réfraction**  
 $n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$

En incidence normale ( $\theta_1 = 0$ )  

$$\frac{I_{\text{transmis}}}{I_{\text{incident}}} = \frac{4 \times n_1 \times n_2}{(n_2 + n_1)^2}$$

15

15

### Lois de Snell-Descartes et indice de réfraction

Indice de réfraction de l'eau (distillée) pour une température de 20° C et une pression atmosphérique standard en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière :

16

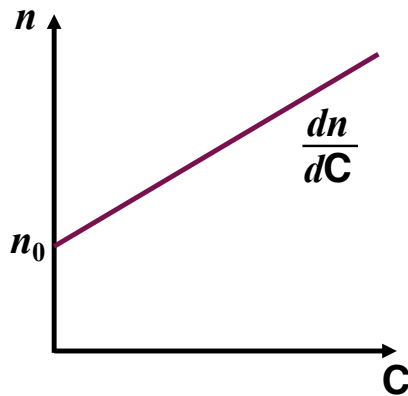
16



## Variation de l'indice de réfraction d'une solution

Soit une solution ou une dispersion d'une substance dans un milieu liquide homogène à la concentration  $C$

**L'indice de réfraction dépend linéairement de la concentration.**



$C$  : concentration des molécules/particules

$n_0$  : indice de réfraction du solvant

$\frac{dn}{dC}$  : incrément d'indice

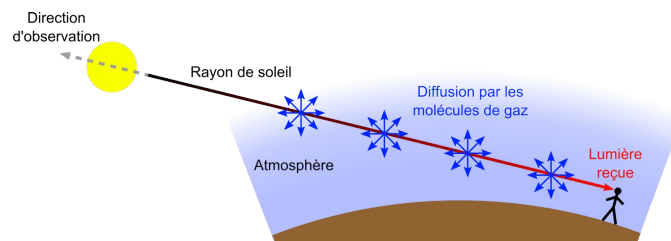
$n = n_0 + \frac{dn}{dC} \times C$  à une longueur d'onde donnée loin d'une bande d'absorption

$\frac{dn}{dC}$  ne dépend pas de la géométrie des molécules/particules  
ne dépend que de leur composition chimique et de la fréquence (longueur d'onde)

17

17

## 2/ Diffusion élastique de la lumière



18

18

## Phénomène de diffusion

Interactions élastiques

des photons avec les électrons présents dans les particules

Intensité incidente

Intensité transmise ( $\lambda, \nu$ )

Intensité diffusée =  $f(\theta)$

Fréquence  $\nu$  non modifiée  
Energie du rayonnement conservée

Intensité diffusée dépend de la polarisabilité  $\alpha$  du matériau  
⇒ Déformation transitoire du nuage électronique

19

19

## Diffusion ou Diffraction

Interactions des photons (X ou UV-visible) avec les électrons présents dans les particules

**Diffusion :**

$I_{\text{diffusée}} ; \lambda$

$I_{\text{transmise}} ; \lambda$

$I_{\text{incidente}} ; \lambda$

**Intensité diffusée dépend de :**

- ⇒ l'angle de diffusion
- ⇒ le nombre et la répartition des électrons au sein de l'échantillon (contraste des particules)
- ⇒ la géométrie des particules pour  $\lambda$  voisine de la taille des particules

**Diffraction :**

$I_{\text{diffusée}} ; \lambda$

$I_{\text{transmise}} ; \lambda$

$I_{\text{incidente}} ; \lambda$

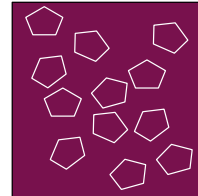
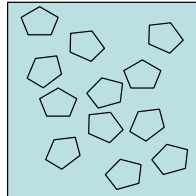
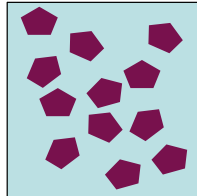
Quand les atomes, molécules ou particules contenus dans l'échantillon forment une **structure organisée** : le phénomène d'interférences entre les ondes diffusées va privilégier certaines directions du rayonnement émis qui sera fonction des distances interparticulaires et de leurs positions relatives

20

20

## Contraste

Pour avoir des informations sur une molécule ou une particule au sein d'un milieu continu, il faut que sa densité de charges électroniques soit différente de celle du milieu !



**Lumière (UV-visible) :**

indice de réfraction du diffuseur  $\neq$  indice de réfraction du milieu continu

Mesure de  $n$  à la longueur d'onde de la lumière utilisée à l'aide d'un réfractomètre

**Rayons X :**

densité électronique du diffuseur  $\neq$  densité électronique du milieu continu

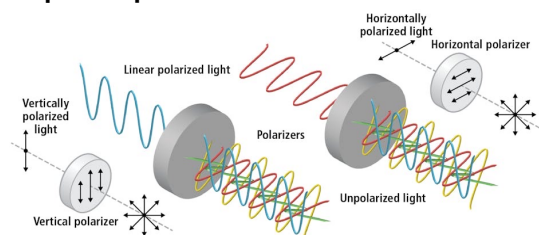
Calcul à partir du nombre d'électrons contenu dans le diffuseur (numéro atomique  $Z$ ) et du volume du diffuseur déterminé à l'aide d'un densimètre

21

21

## Diffusion de Rayleigh

Onde électromagnétique quelconque  
= superposition de 2 ondes de même  
fréquence polarisées V et H



$r$  : distance d'observation

$\theta$  : angle de diffusion

$\lambda_0$  : longueur d'onde dans le vide

$n_1$  : indice du milieu continu

$n_2$  : indice du diffuseur

$m = \frac{n_1}{n_2}$  : indice relatif du diffuseur

Intensité diffusée par  $N$  diffuseurs de volume  $V$

Condition : Taille du diffuseur  $\ll \lambda$

- Composante verticale :

$$I_V = I_0 N \frac{9\pi^2 V^2}{r^2} \left( \frac{n_1}{\lambda_0} \right)^4 \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2$$

- Composante horizontale :

$$I_H = I_0 N \frac{9\pi^2 V^2}{r^2} \left( \frac{n_1}{\lambda_0} \right)^4 \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \cos^2 \theta$$

Onde quelconque :

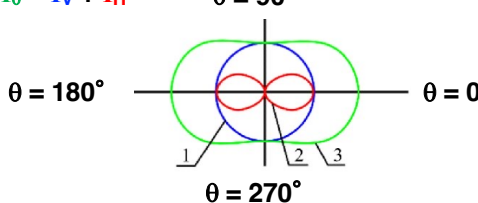
$$I_\theta = I_V + I_H = I_0 N \frac{9\pi^2 V^2}{r^2} \left( \frac{n_1}{\lambda_0} \right)^4 \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 (\cos^2 \theta + 1)$$

22

22

## Diffusion de Rayleigh

$I_\theta = I_V + I_H$        $\theta = 90^\circ$



$\theta = 180^\circ$        $\theta = 0^\circ$

$\theta = 270^\circ$

**Onde quelconque :**

$$I_\theta = I_0 N \frac{8\pi^4 \alpha^2}{\lambda^4 r^2} (1 + \cos^2 \theta)$$

avec  $\vec{m} = \alpha \times \vec{E}$

Quand  $n_1 \neq n_2$        $4\pi \frac{N_A C}{M} \alpha = 2 n_1 \frac{dn}{dC} C$

$\frac{dn}{dC}$  : incrément d'indice du diffuseur

$N_A$  : nombre d'Avogadro;  $M$  : masse du diffuseur;  $C$  : concentration ;  $N = \frac{N_A C}{M}$  : nombre de diffuseurs

**Condition :** Taille du diffuseur  $\ll \lambda$

- **Solution idéale :**

$$I_\theta = I_0 \frac{2\pi^2 n_1^2}{N_A \lambda^4 r^2} \left( \frac{dn}{dC} \right)^2 MC (1 + \cos^2 \theta)$$

- **Solution réelle :**

$$I_\theta = I_0 \frac{2\pi^2 n_1^2}{N_A \lambda^4 r^2 (1 + 2AC)} \left( \frac{dn}{dC} \right)^2 MC (1 + \cos^2 \theta)$$

**A : second coefficient du Viriel**

23

23

## Diffusion de Rayleigh

$$I_\theta = I_0 \frac{2\pi^2 n_1^2}{N_A \lambda^4 r^2 (1 + 2AC)} \left( \frac{dn}{dC} \right)^2 MC (1 + \cos^2 \theta)$$

**A : second coefficient du Viriel**

On pose :  $K = \frac{2\pi^2 n_1^2}{N_A \lambda^4} \left( \frac{dn}{dC} \right)^2$

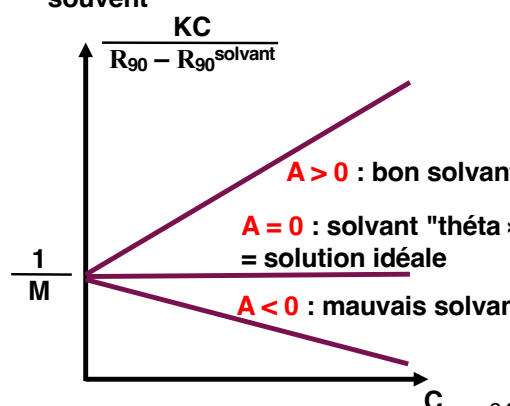
et  $R_\theta = \frac{I_\theta}{I_0} \frac{r^2}{(1 + \cos^2 \theta)} = \text{Rapport de Rayleigh}$

$$\frac{KC}{R_\theta} = \frac{1}{M} + 2AC$$

avec **K : constante d'appareil**  
**R<sub>θ</sub> : rapport de Rayleigh**  
**C : concentration en diffuseur**  
**M : masse du diffuseur**  
**A : second coefficient du Viriel**

On mesure  $I_\theta (\theta = 90^\circ)$  et on trace  $\frac{KC}{R_\theta - R_{\theta}^{\text{solvant}}}$  en fonction de C

en ayant déterminé la constante d'appareil avec un étalon (toluène souvent)

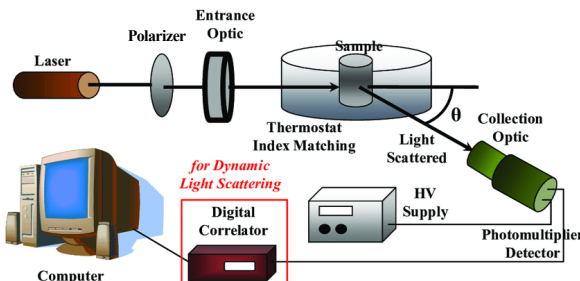
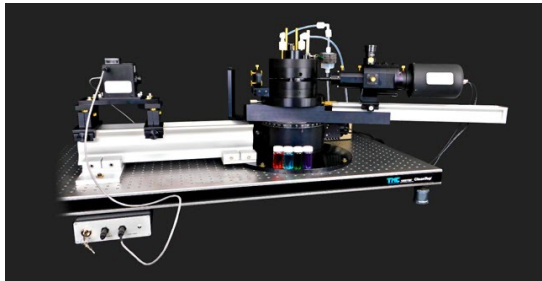


**A > 0 : bon solvant**  
**A = 0 : solvant "théta" = solution idéale**  
**A < 0 : mauvais solvant**

24

24

## Appareil de diffusion de la lumière

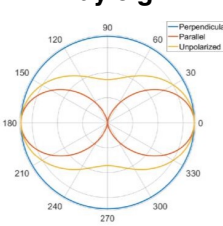
- ① **Laser** : source de lumière de grande puissance et monochromatique  
⇒ généralement polarisée verticalement
- ② **Liquide de thermalisation** : liquide d'indice de réfraction égal à celui du verre  
⇒ minimiser les phénomènes de réflexion et réfraction à l'interface liquide/cellule de mesure
- ③ **Cellule échantillon** : géométrie cylindrique et en verre rectifié
- ④ **Echantillon** : exempt de poussières ou de bulles d'air  
⇒ limiter les phénomènes de diffusion parasite

25

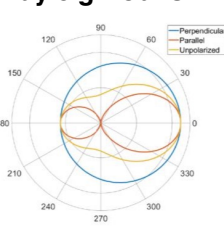
25

## Diffusion de Rayleigh-Gans

**Rayleigh**

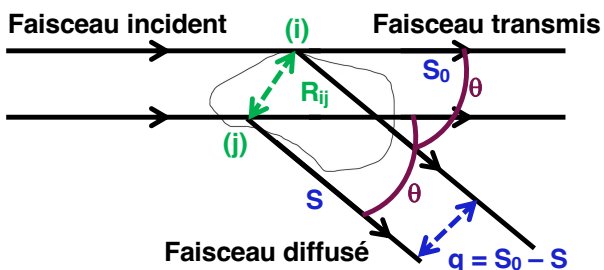


**Rayleigh-Gans**



**Condition** : Taille du diffuseur ≈ λ

$$I_{\theta} = I_0 \frac{2\pi^2 n_1^2}{N_A \lambda^4 r^2 (1 + 2AMC)} \left( \frac{dn}{dC} \right)^2 MC (1 + \cos^2 \theta) \times P(q)$$



**Vecteur de diffusion q =  $\frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$**

**Facteur de forme des particules :**

$$P(q) = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \frac{\sin(q R_{ij})}{q R_{ij}}$$

**Equation de Debye**

26

26

## Diffusion de Rayleigh-Gans

**Facteur de forme des particules :**

**Condition :** Taille du diffuseur  $\approx \lambda$

$$P(q) = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \frac{\sin(q R_{ij})}{q R_{ij}}$$

Développement en série de Taylor :  $\frac{\sin(q R_{ij})}{q R_{ij}} = 1 - \frac{(q R_{ij})^2}{6} + \frac{(q R_{ij})^4}{120} - \dots$

$\Rightarrow$  quand l'angle de diffusion  $\theta \rightarrow 0$ ,  $q \rightarrow 0$  et donc  $P(q) \rightarrow 1$

$\Rightarrow$  quand les distances  $R_{ij}$  sont petites, on retrouve la diffusion de Rayleigh car  $P(q) \rightarrow 1$

Pour des angles de diffusion et pour des particules vérifiant  $qR_{ij} \ll 1$

l'expression de  $P(q)$  devient  $P(q) = 1 - \frac{q^2}{3} \frac{1}{2N^2} \sum_i \sum_j R_{ij}^2 = 1 - \frac{q^2}{3} R_g^2$

**rayon de gyration  $R_g$  = distance quadratique moyenne de tous les points de la molécule/particule à son centre de gravité**


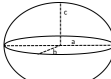
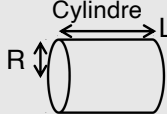

Développement en série de Mac Laurin :  $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$  or quand  $x \rightarrow 0$ ,  $e^x \approx 1 + x$

$P(q) = \exp\left(-\frac{q^2 R_g^2}{3}\right)$  : Approximation de Guinier quand  $q \rightarrow 0$

27

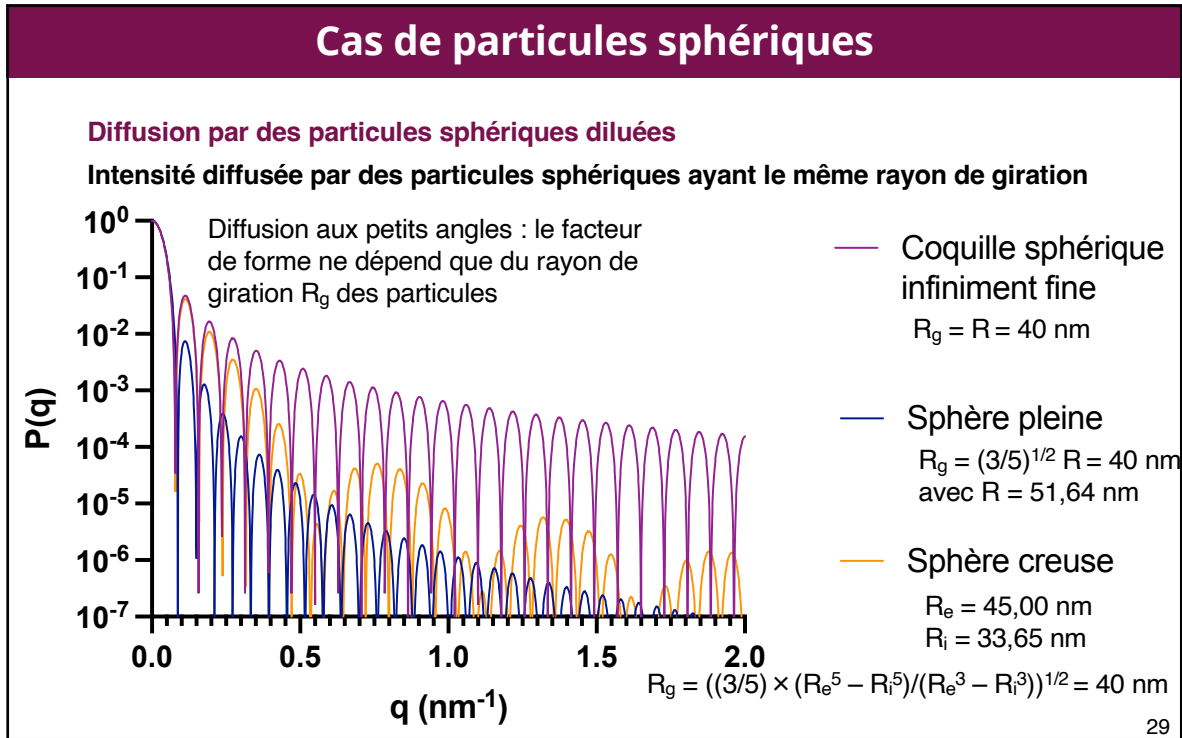
27

## Rayon de gyration et géométrie

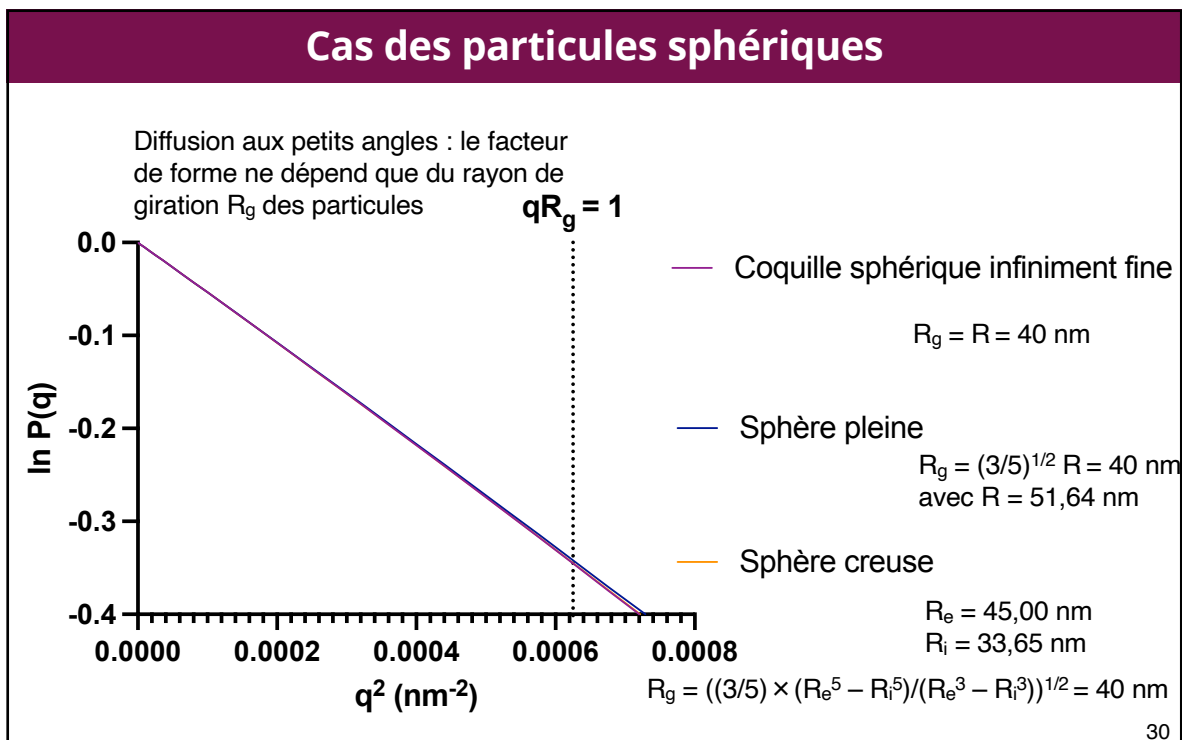
Forme	$R_g^2$	Paramètres géométriques
Sphère 	$\frac{3}{5} R^2$	rayon R
Ellipsoïde de révolution 	$\frac{a^2 + b^2 + c^2}{5}$	demi-axes a, b et c
Cylindre 	$\frac{R^2}{2} + \frac{L^2}{12}$	Rayon R et longueur L
Pelote statistique 	$\left(\frac{1}{6}\right)^2 \langle h^2 \rangle$	$\langle h^2 \rangle$ , carré moyen de la distance entre deux extrémités de la pelote

28

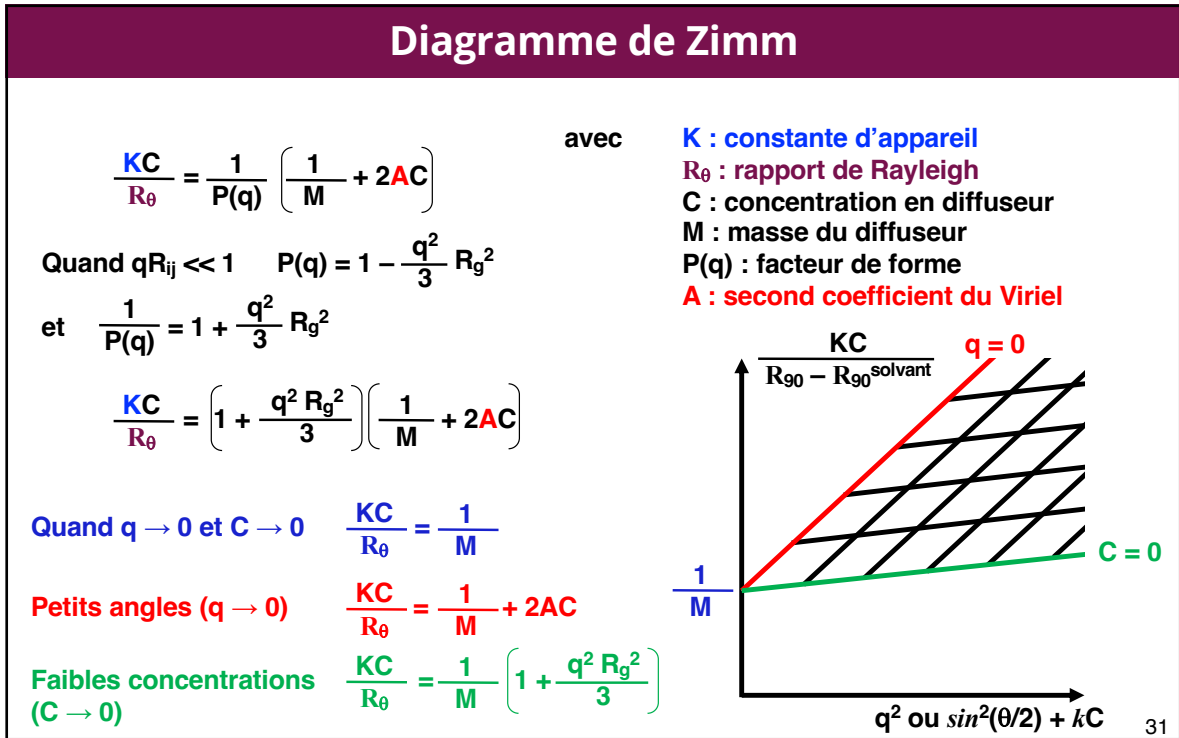
28



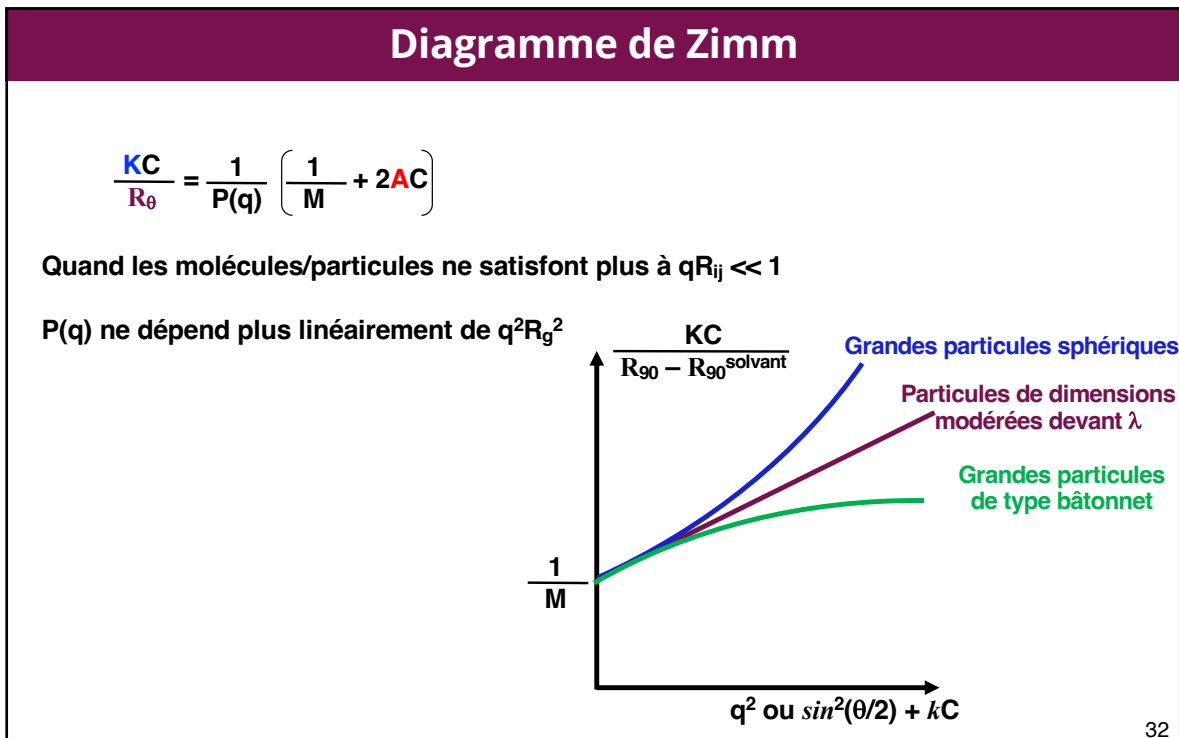
29



30



31

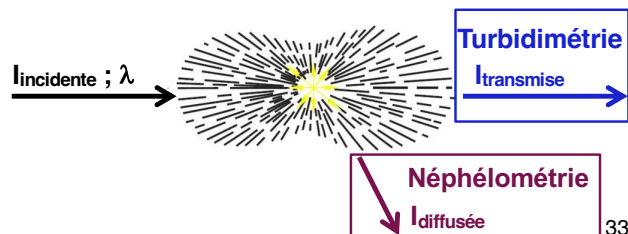


32



## Turbidité

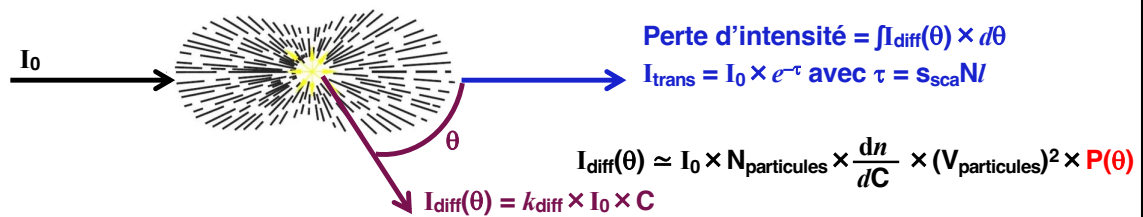
L'intensité  $I$  de l'onde transmise dans la direction de propagation du rayonnement incident est égale à l'intensité du rayonnement incident moins la somme des intensités des ondes diffusées dans toutes les directions de l'espace !



33

33

## Turbidité



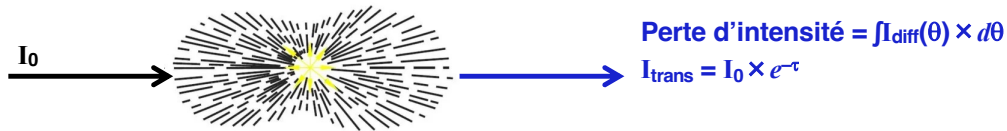
Principaux paramètres dont rend compte la turbidité :

- Variations ou fluctuations de l'indice de réfraction
  - Hétérogénéité de l'échantillon
  - Changement de phase
  - Solubilité
- Solution de macromolécules (polymères, protéines) ou dispersion/suspension de colloïdes
  - Volume
  - Concentration
  - Forme
  - Etat d'agrégation des particules

34

34

## Turbidité



$I_{trans} = I = I_0 \times e^{-\tau}$  avec la turbidité  $\tau$

$\tau = -\ln \frac{I}{I_0} = \sigma_{sca} N l$  avec

- $\sigma_{sca}$  : la section efficace de diffusion par diffuseur ( $m^2$ )
- $N$  : la densité de diffuseur ( $m^{-3}$ )
- $l$  : la longueur du chemin optique (habituellement 1 cm)

Absorbance =  $-\log_{10} \frac{I}{I_0} = \text{Absorbance vraie } (\epsilon C l) + \text{Extinction due à la diffusion } (T)$

Pour des échantillons absorbants qui ont une diffusion de la lumière insignifiante :  
Absorbance =  $\epsilon C l$

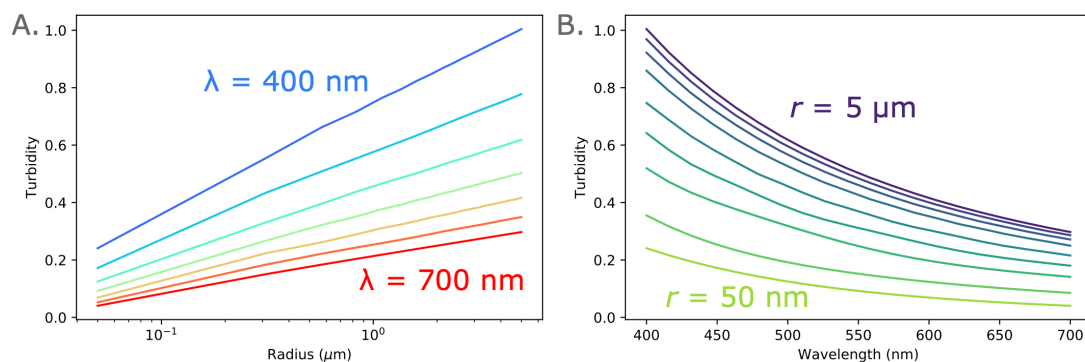
Pour des échantillons non absorbants : Absorbance =  $T \Rightarrow \tau = 2,303 \times T$

35

35

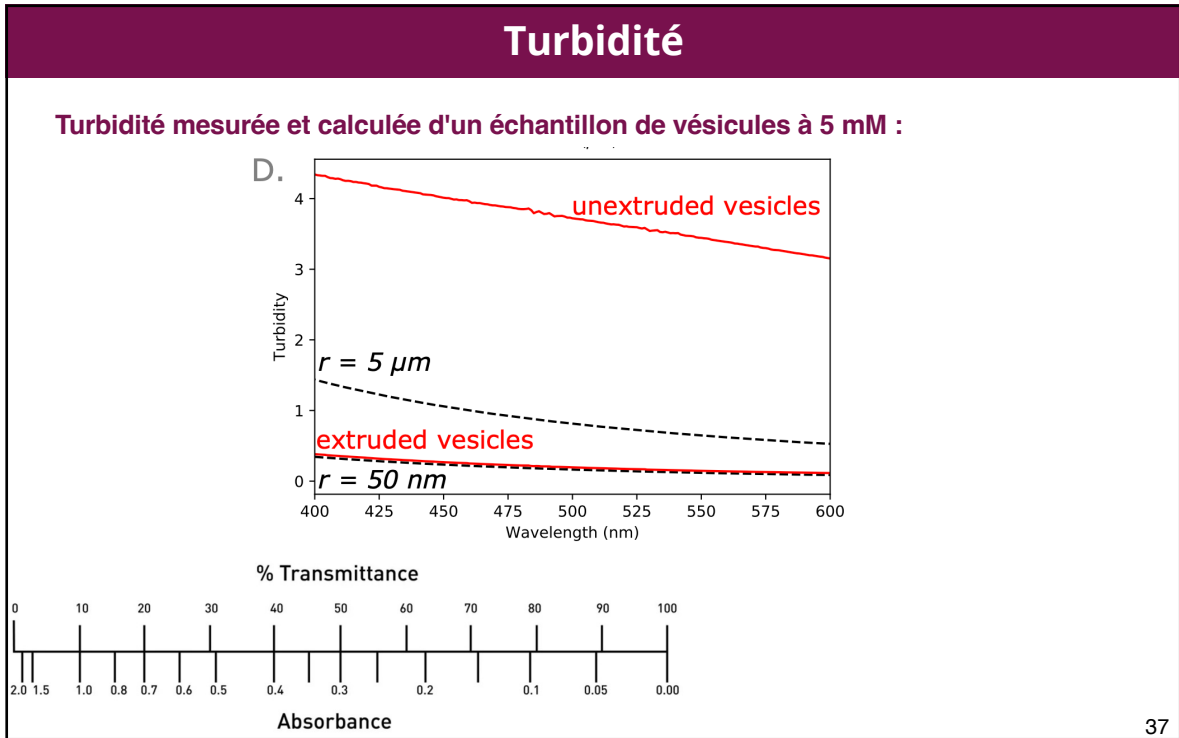
## Turbidité

Turbidité calculée d'un échantillon de vésicules à 5 mM :

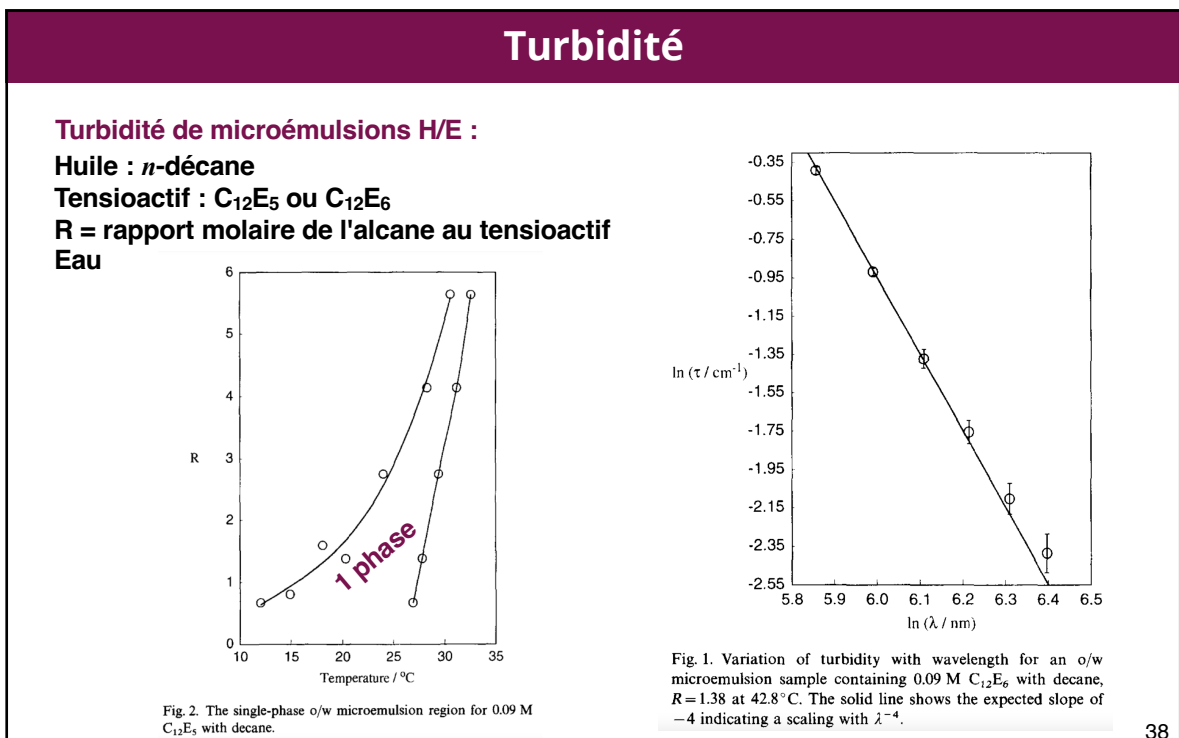


36

36



37



38

# Turbidité

## Turbidité de microémulsions H/E :

**Huile : *n*-décane**

**Tensioactif : C<sub>12</sub>E<sub>5</sub> ou C<sub>12</sub>E<sub>6</sub>**

**R = rapport molaire de l'alcane au tensioactif**  
**Eau**

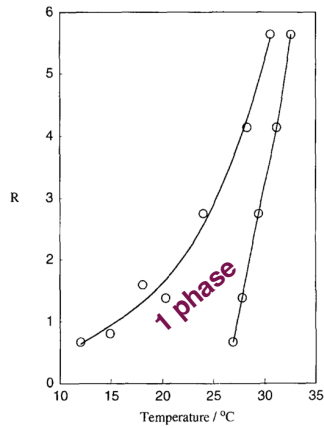


Fig. 2. The single-phase o/w microemulsion region for 0.09 M C<sub>12</sub>E<sub>5</sub> with decane.

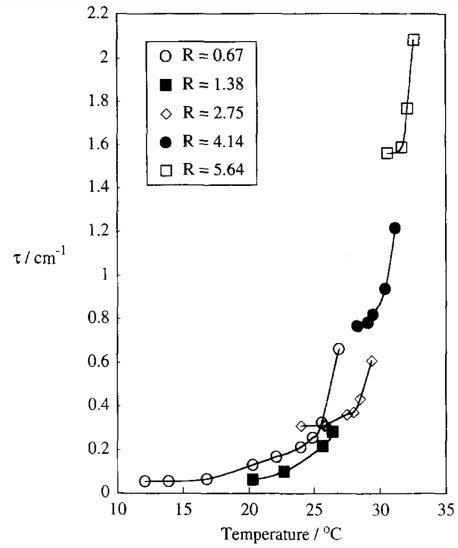
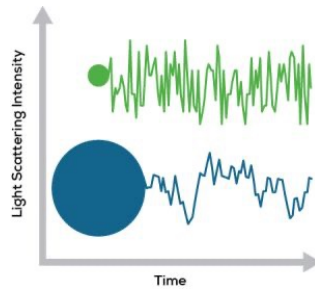


Fig. 5. Variation of turbidity with temperature for o/w micro-emulsions containing 0.09 M C<sub>12</sub>E<sub>5</sub> with decane.

39

39

## 3/ Diffusion quasi-élastique de la lumière visible



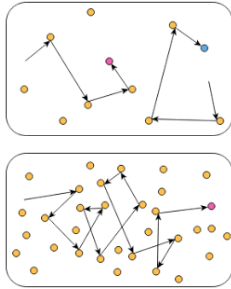
40

40

## Mouvement Brownien

### Mouvement aléatoire des particules dû à l'agitation thermique

**Coefficient de diffusion D** : dépend de la température T, de la viscosité  $\eta$  du milieu et de la taille/forme des particules



**Equation de Stokes-Einstein** : donne la variation du coefficient de diffusion D en fonction du diamètre hydrodynamique  $d_H$  de particules sphériques indépendantes

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\eta d_H} \quad \text{avec } k_B \text{ la constante de Boltzmann}$$

$$k_B = 1,38054 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

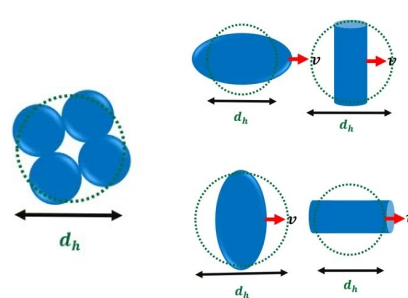
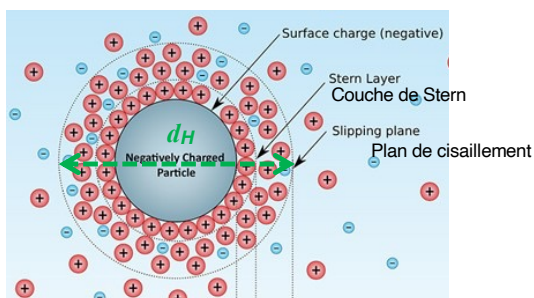
41

41

## Diamètre hydrodynamique

**Diamètre hydrodynamique  $d_H$**  : diamètre de la particule entraînant avec elle une pellicule du milieu dans lequel elle se déplace.

L'épaisseur de cette pellicule peut atteindre quelques couches moléculaires.

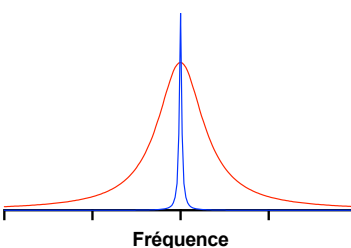


**Cas des particules non sphériques** : le diamètre hydrodynamique  $d_H$  donne le diamètre d'une particule sphérique équivalente (particule sphérique qui se déplacerait avec le même coefficient de diffusion que celui de la particule étudiée). On définit  $d_H$  comme le diamètre hydrodynamique de la sphère équivalente

42

42

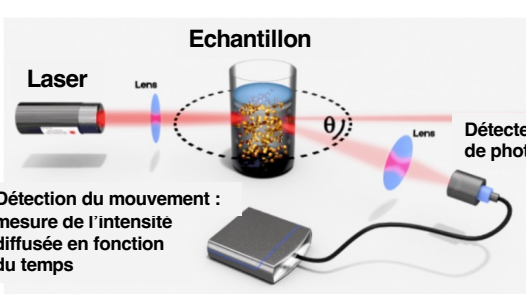
## Diffusion quasi-élastique de la lumière



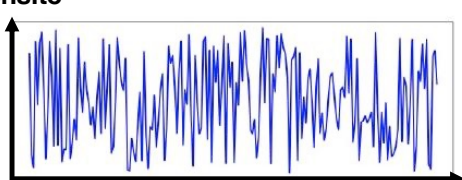
$\Delta\nu = \frac{Dq^2}{2\pi}$  avec  $q$  : vecteur de diffusion =  $\frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$

$\theta$  étant l'angle de diffusion  
 $D$  : coefficient de diffusion translationnelle

Pour des particules sans interactions, la distribution spectrale de l'onde diffusée (intensité en fonction de la fréquence à un instant  $t$ ) est de type Lorentzienne



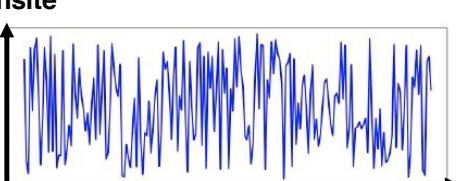
$I(\nu, q) = \frac{\frac{Dq^2}{2\pi}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{Dq^2}{2\pi}\right)^2}$



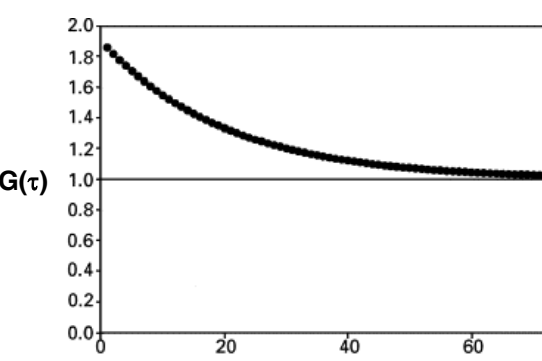
43

43

## Diffusion quasi-élastique de la lumière



**La fonction d'auto-corrélation  $G(\tau)$  rend compte des fluctuations temporelles de l'intensité donc de la position relative des particules.**



$G(\tau) = \langle I(t) \times I(t + \tau) \rangle$

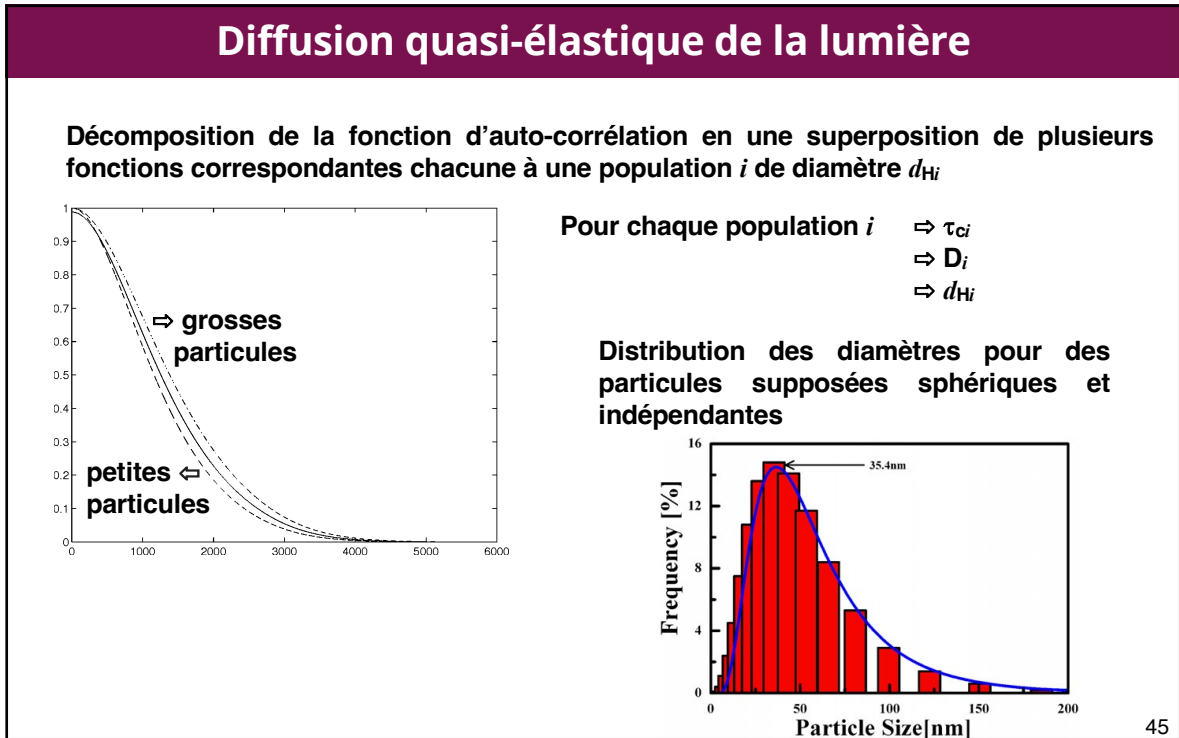
$I(t)$  : Intensité à l'instant  $t$   
 $I(t + \tau)$  : Intensité à l'instant  $t + \tau$   
 $\tau$  : intervalle de temps  
 $\langle \rangle$  : moyenne sur le temps

$G(\tau) = A_1 + A_2 \times e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)}$  avec  $\tau_c = \frac{1}{2Dq^2}$

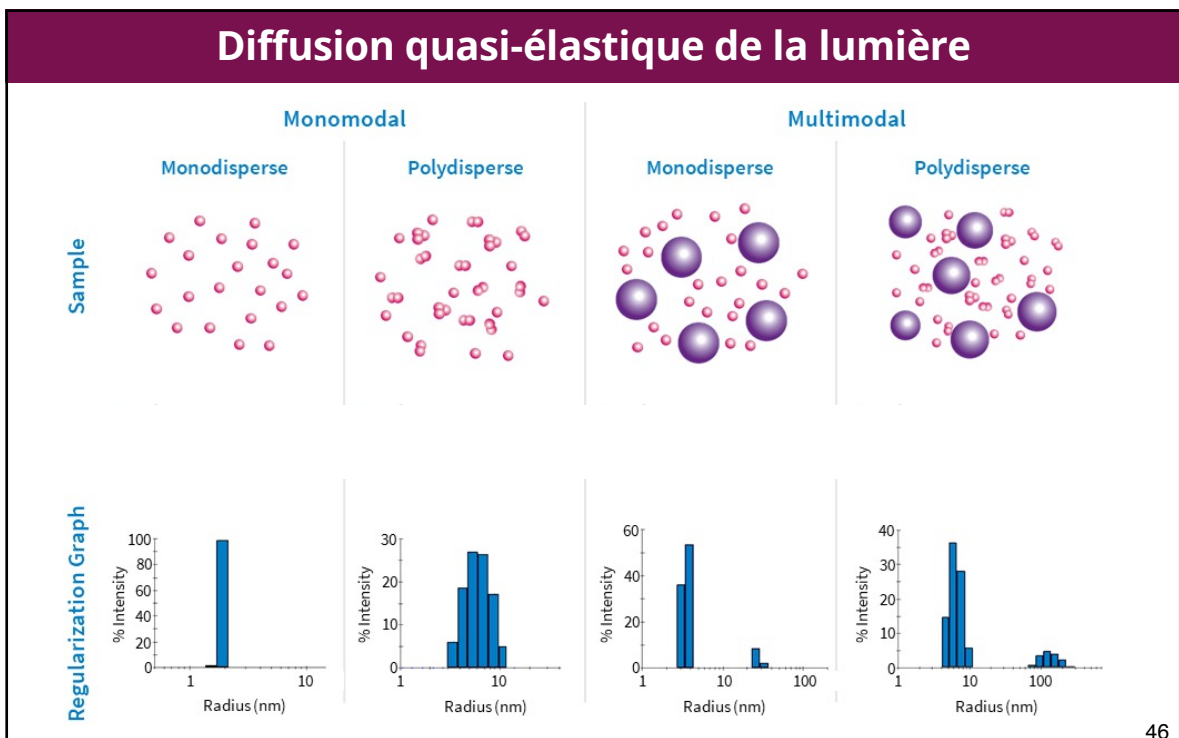
$G(\tau) - 1 = e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)}$   $\Rightarrow \tau_c$   
 $\Rightarrow D$   
 $\Rightarrow d_H$

44

44



45

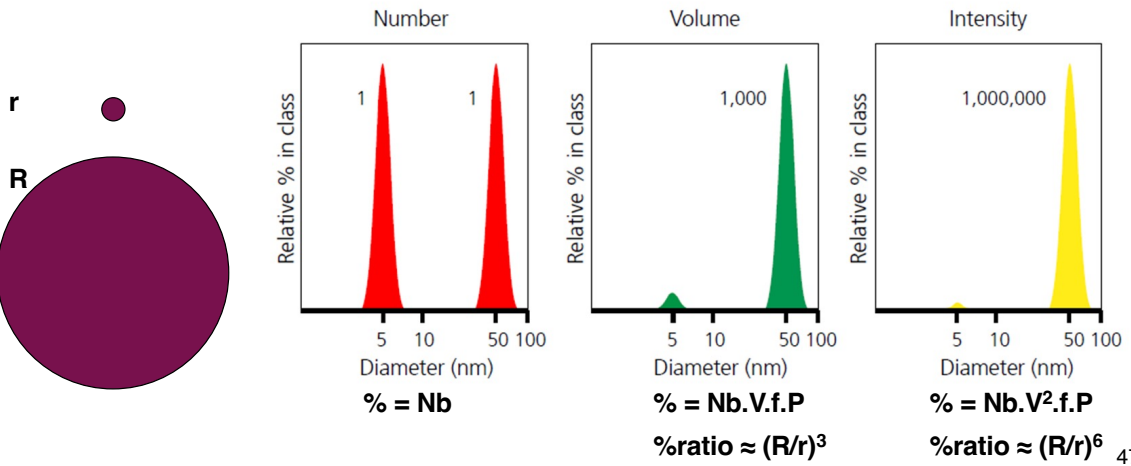


46

## Influence de grosses particules

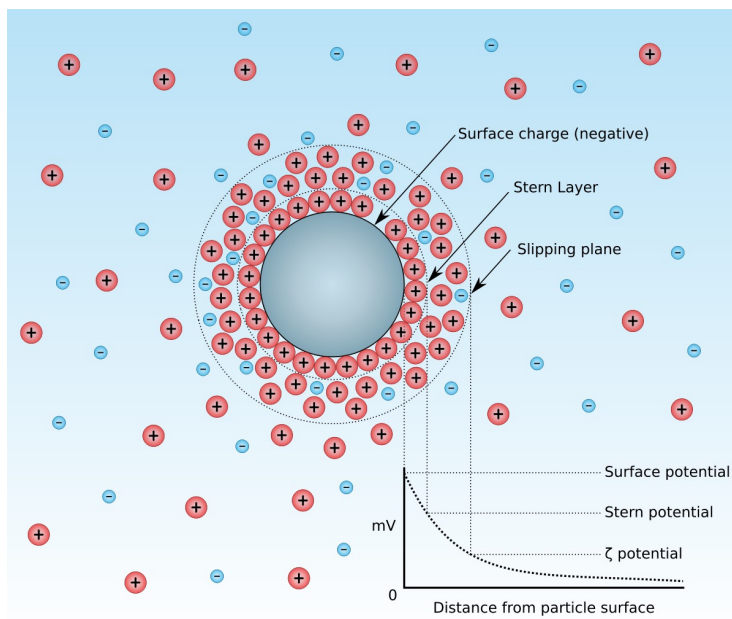
Mélange 50/50 de particules sphériques homogène de même composition

$$\text{Intensité}_{90} = I_0 \times N_{\text{nombre particules}} \times f_{\text{indice particules}} \times V_{\text{volume particules}}^2 \times P_{\text{facteur de forme à } 90^\circ}$$



47

## Particules chargées en surface



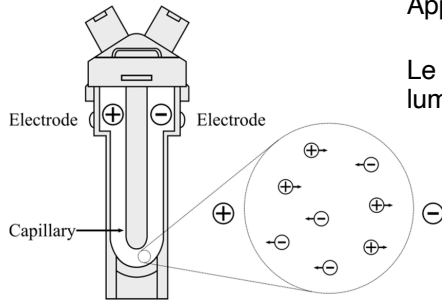
48

48



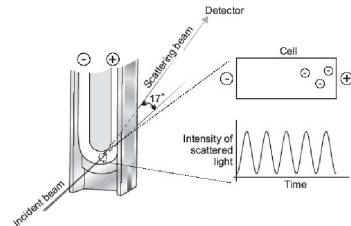
## Mesure du potentiel zéta

### Laser Doppler Velocimetry



Application d'un champ électrique

Le déplacement des particules est suivi par diffusion de la lumière aux petits angles ( $13^\circ$ )



Equation de Henry :  $\mu_{ep} = \frac{2\varepsilon\zeta}{3\eta} \times f(\kappa a)$  avec  $\mu_{ep}$  la mobilité électrophorétique  
 $\varepsilon$  la constante diélectrique  
 $\zeta$  le potentiel zéta

- Fonction de Henry  $f(\kappa a)$  :
- Smoluchowski :  $f(\kappa a) = 1,5$  pour des particules  $> 0,2 \mu\text{m}$  et/ou  $[\text{sel}] > 10^{-3} \text{ M}$
  - Hückel :  $f(\kappa a) = 1,0$  pour des petites particules et/ou des milieux de faible constante diélectrique

49

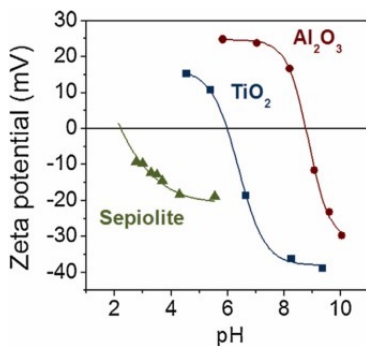
49

## Mesure du potentiel zéta

Le potentiel  $\zeta$  dépend de paramètres extérieurs qui modifient la nature et/ou la charge de l'interface particule/milieu.

### Paramètres :

Concentration, pH, force ionique, nature des espèces chargées constituant l'électrolyte du milieu, la température



Particules stables :  $\zeta > + 30 \text{ mV}$  ou  $\zeta < - 30 \text{ mV}$

Point isoélectrique : un potentiel  $\zeta = 0$  correspond aux conditions de moins bonne stabilité des particules.

50

50