

## 1 Du microscopique au macroscopique

### 1.1 Deux descriptions de la matière

**L'approche micro** (1) décrit le comportement individuel des constituants d'un système (atomes, molécules, particules).

Au niveau microscopique, les particules sont dénombrables ; leur description passe par la mesure de leur position, leur vitesse, leur masse, leur charge électrique, *et cetera*.

La loi des grands nombres empêche totalement une description microscopique complète. La description ne peut être que statistique, d'autant que les lois de la physique quantique sont de nature probabiliste.

**L'approche macro** (2) ne s'intéresse qu'au comportement de l'ensemble des constituants du système, à notre échelle.

Au niveau macroscopique, on utilise des grandeurs comme la quantité de matière (en moles), la température, la pression, le volume, la charge, *et cetera*.

La description macroscopique est possible, mais forcément incomplète, puisque seules les lois de la physique quantique permettent une description exacte.

**Le lien entre les deux** niveaux de description s'effectue en utilisant la constante d'*Avogadro* (3), représentant le nombre d'entités dans une mole de cette entité :

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

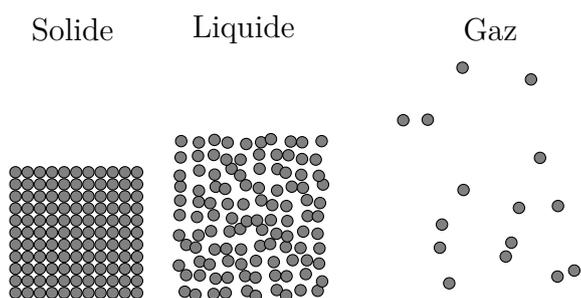


Figure librement adaptée d'après femto-physique.fr

### 1.2 Les trois états physiques

**Dans un solide** (4), les molécules sont liées les unes aux autres, et conservent leurs positions moyennes ;

**Dans un liquide** (5), les molécules sont au contact les unes des autres, mais leurs positions respectives changent sans cesse, ce qui permet au liquide d'adopter la forme du récipient qui le contient ;

**Dans un gaz** (6), les molécules sont très éloignées les unes des autres, et occupent tout l'espace qui leur est offert.

### 1.3 La température

**Une agitation incessante.** Les molécules sont en mouvement incessant : c'est l'*agitation thermique* (7), découverte par le biologiste BROWN, qui le premier a expliqué l'agitation perpétuelle des grains de pollen observés au microscope par le fait qu'ils subissent sans cesse les chocs de molécules.

#### Exemple

Les grains de pollen observés peuvent être comparés à un navire en perdition sur des flots tumultueux.

**Une mesure de l'agitation.** La température est liée à l'agitation thermique. En refroidissant la matière, on ralentit l'agitation thermique, jusqu'à aboutir à l'immobilité de la matière. C'est le *zéro ab* (8), qui a été trouvé à une température de  $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ , ou zéro kelvin (0 K). Il n'est pas possible d'aller plus bas en température.

Entre l'échelle de température  $\theta$  en degrés Celsius ( $^\circ\text{C}$ ) et l'échelle de *température ab* (9) T en kelvin (K), on a la correspondance :  $T = \theta + 273,15$ .

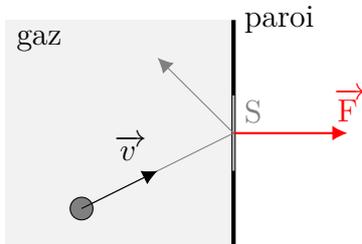
#### Définition

La température *e*  
*cinétique micro*

## 1.4 La pression

Les molécules constituant un solide subissent l'agitation thermique, mais les molécules restent en moyenne à la même position ; en revanche, pour les gaz, ces chocs incessants des molécules entre elles font qu'un gaz va occuper tout l'espace (10). Et

comme les chocs des molécules sur le bord du récipient contenant le gaz ne sont pas compensés, il apparaît une force nette, exercée sur la paroi :



La *pression* (11)  $P$  (en pascal, symbole Pa) exercée par un gaz est par définition la force  $F$  (en newton) exercée par unité de surface  $S$  (en mètre carré) :

$$P = \frac{F}{S}$$

La pression due à l'atmosphère terrestre, au niveau de la mer, vaut  $P = 1013 \text{ hPa}$  (hectopascal), donc  $P = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

La pression d'un gaz est mesurée avec un *manomètre* (12), qui est en général gradué en bar, avec 1 bar qui correspond à « une atmosphère » 1 atm, ou  $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

### Exemple

Attention, les manomètres des stations-service sont gradués à partir de zéro et pas à partir d'un ! Donc ils indiquent la surpression par rapport à la pression atmosphérique, et non la pression absolue.



### Définition

La *pression* faciale microscopique

## 2 Transferts thermiques

### 2.1 Principe d'évolution spontanée

Entre un corps à la température  $T_{\text{chaud}}$  et un autre à la température  $T_{\text{froid}}$ , il peut se produire un *transfert thermique* (13). Le corps froid reçoit de la chaleur lorsque le corps chaud en cède, jusqu'à ce que les deux corps soient à la même température. Ce transfert thermique s'effectue dans un sens privilégié (uniquement du corps chaud vers le corps froid), il est irréversible et spontané.

### Définition

#### Vocabulaire

Il est équivalent de parler d'un échange d'une certaine *quantité de chaleur* (14) ou d'un *transfert thermique* (15).

On note  $Q$  la quantité de chaleur échangée, et on l'exprime en joule (symbole J).

### 2.2 Les trois modes de transferts thermiques

### Définition

Si le système émet ou reçoit des photons, c'est un transfert par *rayonnement électromagnétique* (16).

### Exemple

On se réchauffe au coin du feu grâce au transfert thermique par rayonnement (il n'est pas nécessaire de se placer au-dessus des flammes pour avoir chaud, tout du moins si l'on ne veut pas finir comme Jeanne d'Arc).

Tout corps émet un rayonnement *thermique*, à une longueur d'onde moyenne  $\lambda_m$  en mètre (m) qui ne dépend que de sa température absolue  $T$  en kelvin (K), conformément à la loi de WIEN :  $\lambda_m \cdot T = \text{cte}$ .

### Définition

Si le système échange de l'énergie sans transfert de matière, il s'agit de la *conduction* (17) thermique.

### Exemple

En laissant une fourchette sur le bord d'une casserole, l'on peut se brûler en raison de l'élévation de la température de l'ensemble de la fourchette, par transfert thermique d'une extrémité à l'autre.

### Définition

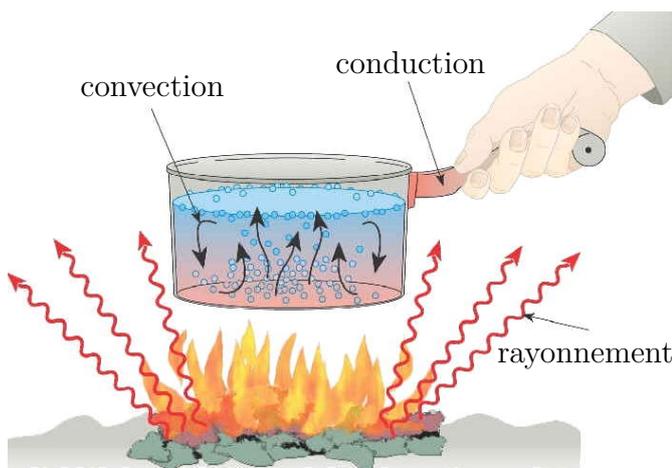
Lorsque le système échange de l'énergie avec transfert de matière, il s'agit de la *convection* (18) thermique.

### Exemple

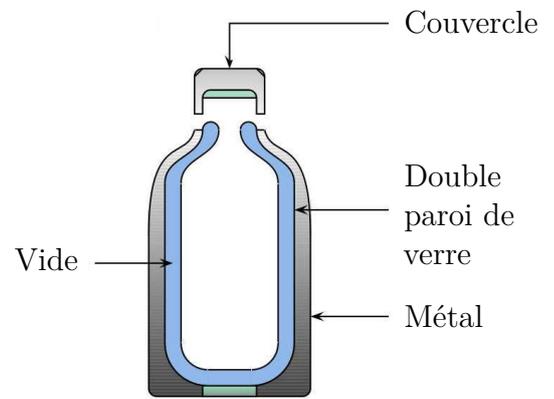
L'eau chauffée dans une casserole est le siège de mouvements de convection qui permettent à l'eau chauffée au fond du récipient, plus légère, de passer au-dessus de l'eau froide.

## 2.3 Exemples

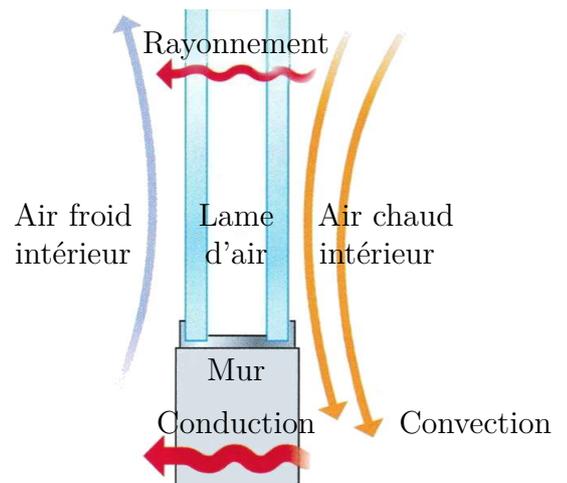
**La casserole.** L'exemple de la casserole fait globalement intervenir les trois modes de transfert thermique. Vous ne prendrez plus jamais votre petit-déjeuner sans penser à cela !



**Bouteille thermos.** Le vide bloque la *convection* (19) et la *conduction* (20); les parois argentées en métal ou en verre recouvert de métal stoppent le *rayonnement* (21).



**Double vitrage.** La lame d'air stable coincée entre les deux vitres minimise la *convection* (22) (transfert thermique avec l'air quand celui-ci s'écoule le long de la vitre); le *rayonnement* (23) est réduit par les réflexions multiples sur les différentes faces des vitres, qui peuvent même être partiellement recouvertes d'un dépôt métallique à l'échelle atomique, pour bloquer le passage des rayons infrarouges sans bloquer le passage de la lumière; la *conduction* (24) est réduite par les changements de milieux.



**Couverture de survie.** Imperméable, elle stoppe le refroidissement dû au vent (*convection* (25)); métallisée, elle stoppe la perte d'énergie par *rayonnement* (26).



**Le calorimètre.** L'équivalent de la bouteille thermos, mais spécialement adapté aux expériences de physique-chimie : voir le TP.

## 2.4 Capacité thermique massique

Le transfert thermique  $Q$  mis en jeu lors d'une variation  $\Delta T$  de la température d'une masse  $m$  d'un corps s'exprime par :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$Q$  transfert thermique ou quantité de chaleur échangée, en joule (J) ;

$m$  masse du corps, en kilogramme (kg) ;

$c$  capacité thermique massique du corps considéré, en joule par kelvin et par kilogramme ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) ;

$\Delta T$  variation de température du corps, en kelvin (K) ou en degrés Celsius ( $^\circ\text{C}$ ).

## 2.5 Énergie massique de changement d'état

Le transfert thermique  $Q$  mis en jeu lors du changement d'état d'une masse  $m$  d'un corps s'exprime par :

$$Q = m \cdot L$$

$Q$  transfert thermique ou quantité de chaleur échangée, en joule (J) ;

$m$  masse du corps ayant changé d'état, en kilogramme (kg) ;

$L$  chaleur latente ou énergie massique du changement d'état, en joule par kilogramme ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

## 2.6 Flux thermique

En physique on désigne par **flux** tout échange d'une **quantité** par unité de temps. L'unité du flux dépend de la quantité échangée.

Si la quantité dont il est question est une quantité de chaleur ou transfert thermique  $Q$ , le flux est alors un **flux thermique**, ou puissance thermique, puisque par définition une puissance est une énergie par unité de temps.

Ainsi, on appelle **puissance** ou **flux** thermique la quantité de chaleur échangée entre un corps chaud et un corps froid, par unité de temps, et s'exprime en watt (symbole W).

### Définition

L'échange d'une quantité de chaleur  $Q$  pendant une durée  $\Delta t$  correspond à une puissance thermique  $\mathcal{P}_{\text{th}}$  tel que :

$$\mathcal{P}_{\text{th}} = \frac{Q}{\Delta t}$$

$\mathcal{P}_{\text{th}}$  puissance ou flux thermique (W) ;

$Q$  transfert thermique en joule (J) ;

$\Delta t$  durée en seconde (s).

Le calcul de la puissance thermique échangée à travers une paroi permet de prévoir un dispositif de chauffage ou de climatisation en conséquence.

La fusion complète d'un glaçon de 20 g dans le creux de la main nécessite cinq minutes.  $L_{\text{fusion}} = 333 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ .

- Calculer le transfert thermique  $Q$ .
- Calculer le flux ou puissance thermique  $\mathcal{P}$  entre la main et le glaçon.
- Proposer une solution pour provoquer une fusion du glaçon deux fois plus rapide.

## 2.7 Résistance thermique

Plus la différence de température entre les deux corps est forte, plus le flux thermique ou puissance thermique échangée sera fort. Il y a proportionnalité :

$$\mathcal{P}_{\text{th}} = \frac{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}}{R_{\text{th}}}$$

Le coefficient de proportionnalité  $R_{\text{th}}$  est appelé **ré** (27) de la paroi séparant le corps chaud du corps froid. Plus la résistance thermique est grande, et plus le flux échangé à travers la paroi est faible. Une paroi de grande résistance thermique est un bon isolant.

Lorsque plusieurs parois sont superposées, leurs résistances thermiques respectives s'additionnent :

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

### Définition

La puissance thermique échangée  $e$  est proportionnelle à l'écart de température  $T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}$  entre le corps chaud et le corps froid ; le coefficient de proportionnalité  $e$  est noté  $R_{\text{th}}$  et s'écrit

$$T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}} = R_{\text{th}} \mathcal{P}_{\text{th}}$$

$T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}$  écart de température en  $^{\circ}\text{C}$  ou en K ;

$R_{\text{th}}$  est noté  
watt ( $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ) ;

$\mathcal{P}_{\text{th}}$  puissance thermique en watt (W).

La donnée de la résistance thermique permet de classer les isolants.

En général les fabricants d'isolant indiquent la résistance thermique d'un mètre carré de leur produit, en omettant l'unité :  $R = 2,56$  signifie qu'un morceau d'isolant de  $1 \text{ m}^2$  a une résistance thermique de  $R_{\text{th}} = 2,56 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Cette valeur est celle d'un pan-

neau de laine de coton de marque Métisse de 100 mm d'épaisseur, en vente chez Casto.



### Remarque

On peut faire une analogie avec la résistance électrique. La tension  $U_{\text{PN}}$  est la différence (de potentiel), l'intensité  $I$  est le flux de charges électriques :

$$R_{\text{th}} = \frac{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}}{\mathcal{P}_{\text{th}}} \quad \text{analogue à} \quad R = \frac{U_{\text{PN}}}{I}$$

Il faut une puissance thermique de 2500 W pour chauffer un appartement à  $20^{\circ}\text{C}$  lorsqu'il fait  $0^{\circ}\text{C}$  à l'extérieur.

- Calculer la résistance thermique de ce logement.
- On souhaite réduire la puissance thermique de 7%. De quelle température faut-il se contenter ?

### Analogie entre électricité et thermodynamique

	Électricité	Thermodynamique
<b>Cause</b>	Différence de potentiel $\Delta V = V_{\text{P}} - V_{\text{N}} = U_{\text{PN}}$ en volt (V)	Différence de température $\Delta T = T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}$ en kelvin (K)
<b>Conséquence</b>	Intensité électrique I en ampère (A)	Flux thermique $\varphi$ ou $\mathcal{P}_{\text{th}}$ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<b>Résistance</b>	Résistance électrique R en $\Omega$	Résistance thermique $R_{\text{th}}$ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<b>Loi</b>	Loi d'Ohm $\Delta V = R \cdot I$	Loi de Fourier $\Delta T = R_{\text{th}} \cdot \varphi$



	Nature de la transformation	Masse (g)	Variation de la température (°C)	Capacité thermique ou chaleur latente	Énergie gagnée ou perdue (J)

**Remarque**

Les capacités thermiques sont exprimées en  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  et la chaleur latente en  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$  :  $c_{\text{glace}} = 2,06 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ,  $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  et  $L_{\text{fusion}} = 333 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ .

# Correction des exercices du chapitre 21

## 21.1 N° 8 p. 409 – Relation de de Broglie

- a. Formule de DE BROGLIE et de la quantité de mouvement :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{et} \quad p = mv \quad \text{donc} \quad \lambda = \frac{h}{mv}$$

Les valeurs numériques sont en rabat de couverture :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^5}$$

$$\lambda = 2,43 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,67 \times 10^{-27} \times 1,64 \times 10^3}$$

$$\lambda = 2,42 \times 10^{-10} \text{ m}$$

- b. Avec des ordres de grandeur respectifs de  $10^{-9}$  et  $10^{-10}$  m, nous sommes dans le domaine des rayons X.

## 21.2 N° 10 p. 409 – Dualité de la lumière

- a. Non, les impacts semblent parfaitement aléatoires.  
b. Il apparaît des franges d'interférence.  
c. Les zones les plus claires, concentrant le maximum d'impacts, sont les zones de probabilité élevée ; et inversement pour les zones sombres, de probabilité faible.  
d. Il faut un grand nombre de photons. C'est la loi des grands nombres.

## 21.3 N° 24 p. 413 – Interférences atomiques

- a. La mélasse optique se doit de ralentir les atomes au maximum, c'est-à-dire de les refroidir, afin d'éliminer au maximum leur agitation thermique, qui pourrait sans cette précaution brouiller les franges. L'agitation thermique correspond à des atomes qui se déplacent aléatoirement dans toutes les directions, dans une marche au hasard incompatible avec le mouvement ordonné que l'on souhaite leur communiquer.  
b.  $\lambda = 15 \text{ nm}$  pour la longueur d'onde des atomes de néon. On peut évaluer leur vitesse en exprimant leur quantité de mouvement selon :

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{et} \quad p = mv \quad \text{donc} \quad v = \frac{h}{m\lambda}$$

La masse  $m$  d'un seul atome de néon s'exprime facilement en fonction de la masse d'une mole  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  d'atomes de néon :

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{20 \times 10^{-3}}{6,022 \times 10^{23}} = 3,3 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

On en déduit la vitesse recherchée :

$$v = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{3,3 \times 10^{-26} \times 15 \times 10^{-9}} = 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Il s'agit d'une vitesse très faible.

### Remarque

En avance sur le chapitre 23 : Le néon est considéré comme un gaz parfait monoatomique, sa température absolue  $T$  s'exprime en fonction de la vitesse moyenne des atomes selon :

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2 \quad \Leftrightarrow \quad T = \frac{1}{3}mv^2$$

$$T = \frac{1}{3} \times 3,3 \times 10^{-26} \times (1,3)^2 = 1,9 \times 10^{-26} \text{ K}$$

La mélasse optique a bien joué son rôle : les atomes sont ultra-froids.

- c. Une interfrange  $i = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$  est mesurée lors de cette expérience. Exprimons la longueur d'onde :

$$i = \frac{\lambda D}{a} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{ia}{D}$$

$$\lambda = \frac{2 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^{-6}}{0,85}$$

$$\lambda = 1,4 \times 10^{-8} \text{ m} = 14 \text{ nm}$$

Pour juger de l'accord, calculons l'écart en pourcentage :

$$\Delta\% = \frac{|\lambda_{\text{exp}} - \lambda_{\text{th}}|}{\lambda_{\text{th}}}$$

$$\Delta\% = \frac{|14 - 15|}{15} = 6,7 \%$$

L'écart est supérieur à 5 %, ce qui est acceptable pour une expérience japonaise.

- d. L'aspect particulière des atomes se manifeste par leurs impacts individuels sur l'écran de détection. L'aspect ondulatoire se manifeste par les interférences. Le texte indique que « la densité des impacts en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'a un atome de se retrouver en ce point ».

**21.4 N° 6 p. 408 – Effet Compton**

- a. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques, dont la longueur d'onde est très faible, de l'ordre de  $10^{-10}$  m.
- b. Les particules entrant en collision sont le photon et l'électron. Un photon incident entre en collision avec un électron de la cible, en lui cède une partie de son énergie et de sa quantité de mouvement, lors d'un choc élastique (rappel : on appelle « choc élastique » un choc au cours duquel l'énergie et la quantité de mouvement se conservent).
- c. L'expérience est une vérification du caractère corpusculaire des ondes électromagnétiques. Donc de la fameuse dualité onde-corpuscule, qui s'applique (entre autres) aux ondes électromagnétiques : les rayons X sont des particules, avec une certaine énergie et une certaine quantité de mouvement.

**21.5 N° 20 p. 413 – Effet Compton**

- a. Rappel des notations internationales pour les analyses dimensionnelles, pour les sept unités fondamentales :

Grandeur de base	Symbole de la dimension
Longueur	L
Masse	M
Temps ou durée	T
Intensité électrique	I
Température	$\Theta$
Quantité de matière	N
Intensité lumineuse	I

La constante de Planck  $h$  s'exprime en joule fois seconde (J·s, une énergie multipliée par un temps) ; pour exprimer l'unité d'énergie, le joule, on peut détailler en utilisant  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$  par exemple, donc des kilogrammes fois des mètres au carré divisés par des secondes au carré. On peut donc simplifier :

$$[h] = M \times L^2 \times T^{-2} \times T \\ = M \times L^2 \times T^{-1}$$

L'unité du numérateur est plus facile à trouver, une masse fois une vitesse :

$$[m_e c] = M \times L \times T^{-1}$$

On en déduit l'unité du rapport  $\frac{h}{m_e c}$  :

$$\left[ \frac{h}{m_e c} \right] = \frac{M \times L^2 \times T^{-1}}{M \times L \times T^{-1}} = L \quad \text{c. q. f. d.}$$

- b. Le cosinus d'un angle est entre -1 et 1, donc  $0 \leq 1 - \cos \theta \leq 2$  pour tout angle  $\theta$ . Calculons le rapport  $\frac{h}{m_e c}$  pour un électron de la cible :

$$\frac{h}{m_e c} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^8} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$$

Ainsi, l'écart entre les longueurs d'onde des photons incidents et diffusés sera compris entre 0 et  $2 \times 2,43 \times 10^{-12} = 4,86 \times 10^{-12}$  m, donc de l'ordre de  $10^{-12}$  m au maximum. L'effet relatif serait très faible et difficile à mettre en évidence sur des photons visibles, de longueur d'onde entre 380 nm et 780 nm, donc de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-6}$  m.