

## Transferts d'énergie microscopique et macroscopique

L'étude des transferts d'énergie est un enjeu économique et écologique. Ces transferts se font au niveau microscopique et macroscopique. Leur étude nécessite de définir de nouveaux outils théoriques comme l'énergie interne, mais aussi d'effectuer un bilan énergétique.

### Introduction – Du microscopique au macroscopique

#### a – Microscopique ou macroscopique ?

Les Sciences Physiques se proposent d'étudier les phénomènes dont l'accès direct est macroscopique ; leur interprétation repose in fine sur les comportements microscopiques de la matière, dont l'accès est indirect. Comment faire le lien ?

L'approche **microscopique** décrit le comportement individuel des constituants d'un système (atomes, molécules, particules). L'approche **macroscopique** ne s'intéresse qu'au comportement de l'ensemble des constituants du système, à une échelle facilement accessible à l'être humain.

Les dimensions des atomes sont si petites que le moindre échantillon contient un nombre colossal d'atomes et de molécules.

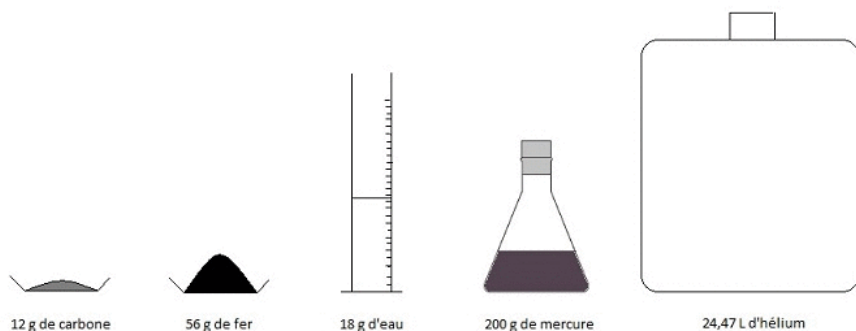
Le chimiste ne manipule pas les espèces molécule par molécule ; pourtant, la chimie explique les transformations de la matière par la connaissance de sa structure intime. Le lien entre ces deux niveaux peut s'effectuer en utilisant la constante d'Avogadro  $N_A$ , représentant le nombre d'entités dans une mole.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Rappel : la constante d'Avogadro représente le nombre d'atomes dans 12 g de carbone isotope 12.

Ainsi, le nombre  $N$  de molécules est lié à la quantité de matière  $n$  par la relation

$$N = n \times N_A$$



Quel lien entre ces 5 échantillons ?  
Chacun contient environ 600 000 milliards de milliards d'entités constituantes...

#### b – Les limites du microscope optique

Les tailles des molécules sont très variables : de la plus petite, le dihydrogène  $H_2$ , aux macromolécules (polymères, ADN), les dimensions varient énormément. On peut toutefois considérer que l'ordre de grandeur de la dimension d'une molécule est le nanomètre.

Pour la petite histoire, Benjamin Franklin a été à l'origine d'une méthode ingénieuse permettant d'accéder à cet ordre de grandeur (voir document).

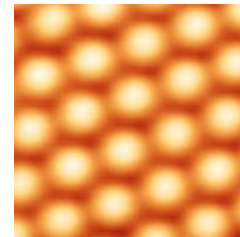
De la même manière, pour les atomes, on considère que  $10^{-10}$  m (une centaine de picomètres) constitue un bon ordre de grandeur.

Un microscope optique ne permet pas de visualiser des atomes ou des molécules. En lumière visible, le microscope optique ne pourra jamais s'affranchir du phénomène de la diffraction qui limitera sa précision.

La diffraction se produit si le rapport  $\lambda/a$  n'est pas négligeable et donc si la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture. Pour la lumière visible (400 à 800 nm), les plus petits objets observables par un microscope optique auront une taille caractéristique de l'ordre d'une centaine de nanomètres ( $10^{-7}$  m).

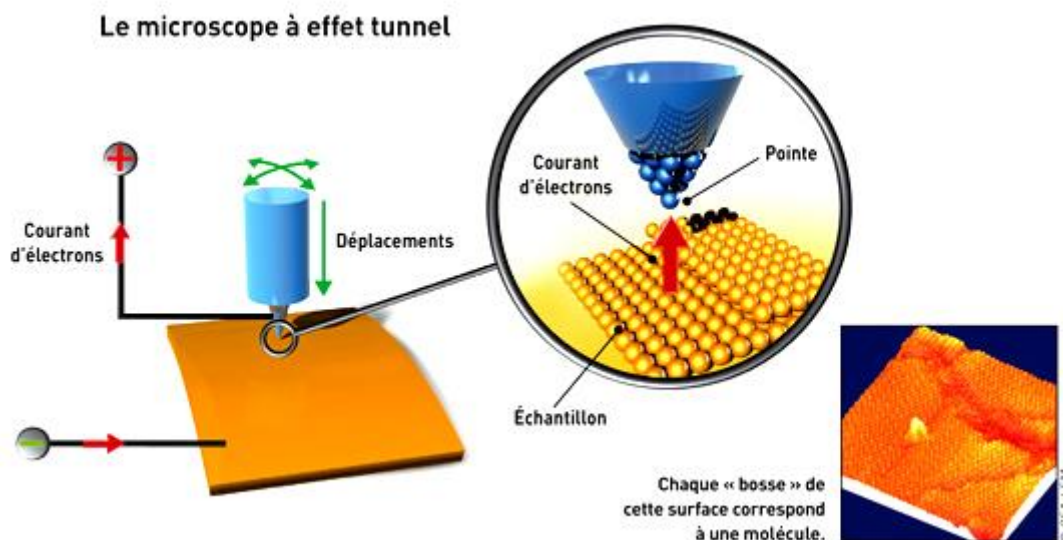
c – Comment visualiser des molécules et des atomes ?

Le microscope à effet tunnel (STM pour Scanning Tunnel Microscope) a été mis au point en 1981 par une équipe de chercheurs d'IBM (Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, prix Nobel de Physique en 1986) qui parvient à montrer des « images » d'une surface de silicium à l'échelle atomique.



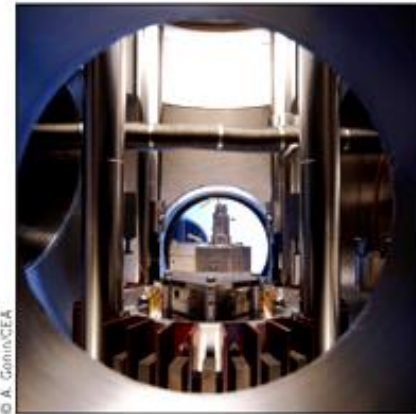
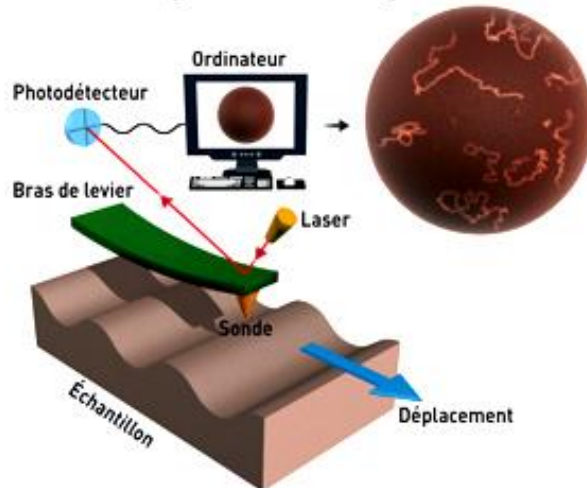
Atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium SiC observés par STM.

Ce microscope doit son nom à la propriété quantique de la matière qui est à la base de son fonctionnement : l'effet tunnel. Une pointe métallique est positionnée avec une très grande précision près de la surface à observer. L'effet tunnel se produit ensuite, engendrant un courant électrique (circulation d'électrons) entre la surface et la pointe. L'analyse de ce courant par un ordinateur permet de reconstituer une « image » de la surface avec une précision nanométrique.



D'autres microscopes, toujours plus précis, ont depuis été mis au point, comme le microscope à force atomique en 1985, qui utilise la force de répulsion entre d'une part les nuages électroniques des atomes de la surface à imager et d'autre part le nuage électronique des atomes de la pointe.

**Le microscope à force atomique**



Vue, à travers un hublot, d'un microscope à force atomique (AFM) fonctionnant sous ultraviolette.

Ces instruments permettent de travailler à l'échelle microscopique et ont ouvert la porte aux nanotechnologies.

**1 - Transferts d'énergie macroscopiques**

**1.1 - Notion d'énergie interne**

L'énergie est un concept développé par le physicien en respect d'une propriété fondamentale : l'énergie doit se conserver. Ainsi, en mécanique, nous avons vu que l'énergie mécanique  $E_m$  pouvait, elle, ne pas se conserver, mais sa diminution se fait par conversion en une autre forme d'énergie : l'énergie interne, notée  $U$ . Dès lors, c'est l'ensemble  $E = E_m + U$  qui reste constant au cours du temps.

L'énergie interne d'un système est exprimée en joules (J), est une grandeur macroscopique définie comme la somme des énergies microscopiques des particules constituant le système étudié - elle mesure l'énergie stockée par un système, autrement que sous forme d'énergie cinétique ou d'énergie potentielle.

L'énergie interne intègre les énergies cinétiques des particules composant le système (qui sont en mouvement du fait de leur agitation thermique) et les énergies potentielles d'interactions électromagnétiques entre atomes (liaisons au sein des molécules), entre ions (cohésion d'un cristal ionique) et entre molécules (interactions de van der Waals, liaisons hydrogène).

$$U = \sum E_{c,agit.thermique} + \sum E_{p,interactions}$$

Il n'est pas possible a priori de déterminer l'énergie interne absolue d'un système : à l'instar d'un potentiel, seule est mesurée sa variation  $\Delta U$ , qui dépend uniquement de l'état initial du système et de son état final, sans influence de la nature de la transformation faisant évoluer le système.

Par exemple, pour un système isolé, l'énergie interne ne varie pas :  $\Delta U = 0$ .

Dans les états condensés (solide ou liquide), les corps subissent des variations de volume relativement faibles, ce qui permet d'obtenir des expressions simples de  $\Delta U$ .

Soit un système solide ou liquide, de masse  $m$ , qui n'échange de l'énergie que par transfert thermique et ne change pas d'état physique lors de cet échange. Sa variation d'énergie interne est donnée par la relation de calorimétrie

$$\Delta U = m \times c \times \Delta T$$

où  $\Delta U$  est en joules (J), m en kilogrammes (kg),  $\Delta T = T_f - T_i$  en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou en kelvins (K).

La grandeur  $c$  est appelée **capacité thermique massique** du solide ou du liquide en question, exprimée en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Elle correspond à l'énergie qu'il faut fournir pour augmenter de 1 K (ou de  $1^{\circ}\text{C}$ ) la température d'un corps de 1 kg.

Matériau	Capacité thermique massique (en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
eau	4 180
cuivre	385
bois	$1,2 \cdot 10^3$ à $2,7 \cdot 10^3$ selon le bois
brique	840
verre	720
aluminium	897

### Exercice

Une cuillère à soupe est plongée dans un bol de soupe de 250 mL, initialement à  $50^{\circ}\text{C}$  et finalement à  $42^{\circ}\text{C}$ . En considérant que la soupe est uniquement constituée d'eau, déterminer sa variation d'énergie interne.

Réponse :  $\Delta U = - 8,4 \cdot 10^3 \text{ J}$ .

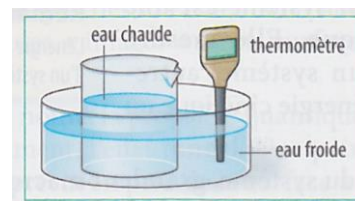
### Remarque

Pour décrire les échanges d'énergie à l'échelle microscopique, il faut avoir recours à une théorie physique adaptée : la mécanique quantique, dont nous donnerons un premier aperçu.

De manière générale, il faut bien éviter de mêler, dans une même explication, des points de vue microscopique et macroscopique.

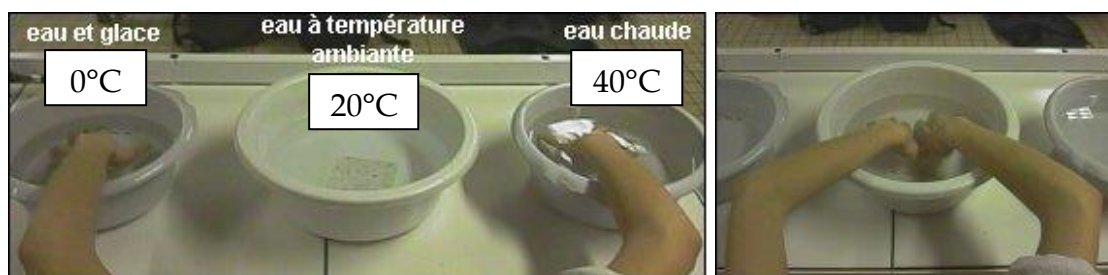
## 1.2 - Transferts thermiques

Si le système étudié est en contact matériel avec un corps de température différente, il s'effectuera un transfert d'énergie, appelé transfert thermique  $Q$  (en joules), du fait de cette seule différence de température.



### Attention : il ne faut pas confondre transfert thermique et température.

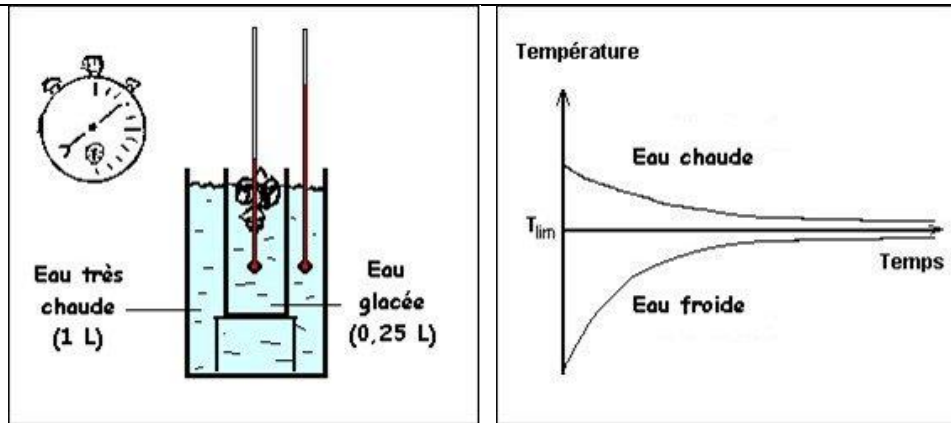
Le terme de transfert thermique est préféré à « chaleur ». Dans la vie courante, la chaleur est souvent confondue avec un état de température ; le transfert thermique est un échange d'énergie entre deux systèmes et ne peut être assimilé à la température d'un système.



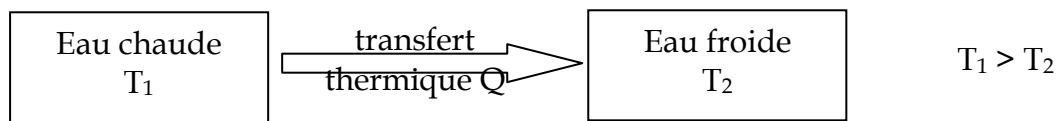
Les températures des bassines sont relevées au thermomètre.

Les mains restent quelques minutes dans les bassines de gauche et de droite puis sont plongées dans la bassine du milieu. Cette dernière paraît chaude à la main gauche, et froide à la main droite ; pourtant, sa température est de  $20^{\circ}\text{C}$  !

Le transfert thermique entre deux corps en contact se produit toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Si les deux corps sont à la même température, le transfert thermique cesse, on parle d'équilibre thermique.



La température des deux milieux tend vers une température d'équilibre. L'augmentation de température de l'eau froide est plus importante que la diminution de celle de l'eau chaude : il y a en volume quatre fois plus d'eau chaude que d'eau froide (inertie plus grande).



### Interprétation

La température d'un corps est une grandeur macroscopique. Au niveau microscopique, elle mesure l'agitation des atomes ou des molécules qui constituent le corps.

On peut ainsi expliquer le transfert thermique, notion macroscopique, au niveau microscopique : les particules du corps qui possède la température la plus élevée sont celles qui possèdent la plus grande agitation, c'est-à-dire la plus grande énergie cinétique.

Au voisinage de la surface de contact entre les deux corps, ces particules vont transférer une part de leur énergie aux particules du corps de température plus basse.

Ce gain d'énergie cinétique des particules va impliquer, au niveau macroscopique, une élévation de la température du corps. Par opposition, le corps de température initiale plus élevée va voir sa température baisser, puisque ses particules perdent de l'énergie cinétique en transférant une part de cette énergie cinétique.

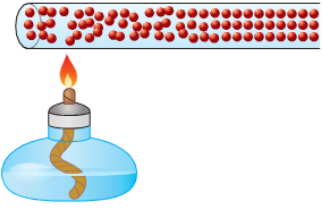
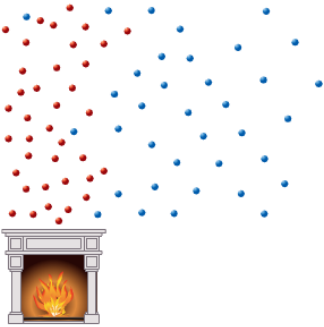
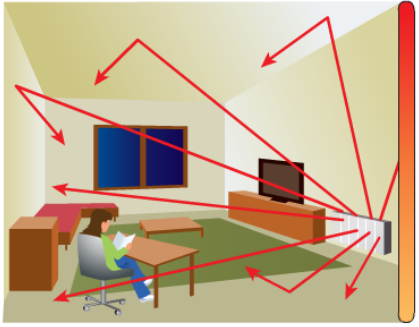
L'équilibre macroscopique des températures correspondra ainsi à un équilibre énergétique au niveau microscopique.

### Remarque : la notion d'entropie (hors programme)

Le second principe de la thermodynamique ou principe de Carnot insiste sur l'irréversibilité des phénomènes réels. Pour le traduire, Ludwig Boltzmann a défini le concept d'entropie, outil de mesure du désordre des systèmes. Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et du milieu extérieur : une transformation réelle s'accompagne d'une création d'entropie, i.e. d'une augmentation du désordre.

Les transferts thermiques peuvent s'opérer de trois façons.

- La **conduction** est un transfert thermique par contact sans transport de matière : d'un point de vue microscopique, les constituants du matériau conducteur communiquent à leurs voisins leur agitation thermique, tout en restant globalement à la même place.
- La **convection** est un transfert thermique porté par un mouvement de matière ; ce mode de transfert thermique ne concerne pas les solides.
- L'émission ou la réception d'un **rayonnement** (onde électromagnétique) s'accompagne d'un transfert thermique. C'est le type de transfert thermique rencontré entre le Soleil et la Terre.

Conduction	Convection	Rayonnement
		
L'agitation des atomes est diffusée à partir de la partie chauffée du métal.	L'air chaud se déplace dans la pièce et augmente l'agitation des molécules de l'air froid avec lequel il se mélange.	Le rayonnement émis par une source d'ondes électromagnétiques se propage dans toutes les directions possibles.

Remarque : parmi les appareils de chauffage (« radiateur »), on distingue les convecteurs et les radiants...

### 1.3 – Transfert thermique à travers une paroi plane

#### 1.3.1 – Notion de flux thermique

Le flux thermique à travers une surface est la puissance thermique qui la traverse. Il évalue la rapidité du transfert thermique, et s'obtient en divisant l'énergie  $Q$  du transfert thermique par sa durée  $\tau$ ,

$$\Phi = \frac{Q}{\tau}$$

Le flux thermique s'exprime en watts (W) si l'énergie  $Q$  est en joules (J) et la durée  $\tau$  en secondes (s).

Exemple : un mur qui laisse passer en une heure une énergie  $Q = 1,5 \cdot 10^3$  J est le siège d'un flux thermique de 0,42 W.

#### 1.3.2 – Résistance thermique d'une paroi plane

La résistance thermique d'un corps traduit sa capacité à s'opposer au transfert thermique (on retrouve ici une analogie forte avec l'électricité).

Elle dépend de la surface, de l'épaisseur de la paroi et du matériau qui la constitue,

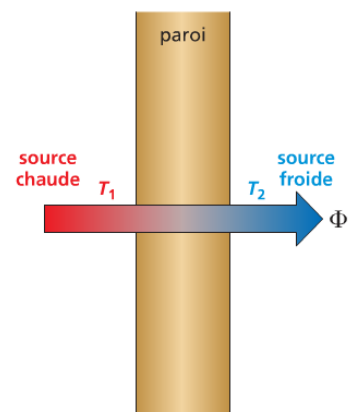
$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

où  $R_{th}$  est en  $K \cdot W^{-1}$  si  $e$  est l'épaisseur de paroi en m,  $S$  sa surface en  $m^2$  et  $\lambda$  la conductivité thermique du matériau en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Les résistances thermiques s'additionnent.

$$R_{th,mur} = R_{th,brique} + R_{th,polystyrene} + R_{th,platre}$$

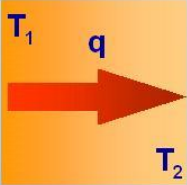
Soit une paroi plane dont les deux faces sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$  telles que  $T_1 > T_2$ . Le flux thermique  $\Phi$  qui la traverse est



$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} > 0$$

On note ici que le transfert thermique se fera toujours de la pièce chaude à la pièce froide à travers cette paroi ; ce transfert est irréversible.

	sec	hum.		Conductivité thermique des matériaux $\lambda$ en W/m.K
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,053		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1000 kg/m <sup>3</sup>	
	0,54	0,75	briques 1000-1600 kg/m <sup>3</sup>	
	0,90	1,1	briques 1600-2100 kg/m <sup>3</sup>	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux		45	acier	
		203	aluminium	
		384	cuivre	



### 1.4 – Bilans énergétiques

L'énergie totale d'un système E est donnée par la relation

$$E = E_c + E_p + U = E_m + U$$

avec  $E_c$  l'énergie cinétique du système,  $E_p$  la somme des énergies potentielles du système,  $E$  l'énergie interne du système et  $E_m$  l'énergie mécanique du système.

Si l'énergie totale d'un système varie, c'est que ce système a reçu ou cédé de l'énergie, par travail  $W$  ou par transfert thermique  $Q$ . La variation de son énergie totale  $\Delta E$  s'écrit

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q$$

La variation de l'énergie interne d'un système est due aux transferts par travail électrique (noté  $W_e$ ), par travail mécanique (noté  $W$ ) ou aux transferts thermiques (notés  $Q$ ).

Si un système n'échange pas de travail  $W$  et de transfert thermique  $Q$  avec l'extérieur, alors l'énergie totale de ce système est conservée : on dit que ce système est isolé.

Effectuer un bilan énergétique sur un système lors d'une transformation consiste à

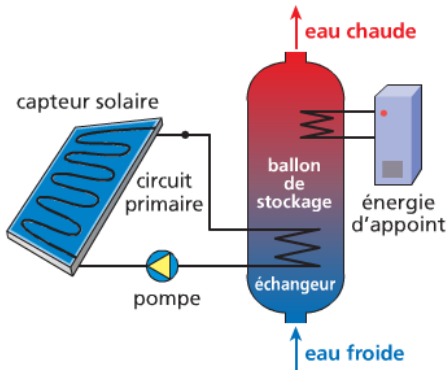
- déterminer tous les transferts énergétiques qui ont lieu entre le système et l'extérieur : les énergies reçues sont comptées positivement, les énergies cédées négativement.
- représenter éventuellement les transferts par une chaîne énergétique, en distinguant les convertisseurs d'énergie des systèmes qui la stockent
- conclure par une évaluation de l'efficacité de la transformation

Lorsque l'étude porte sur un convertisseur d'énergie, le bilan est conclu par un calcul de rendement, compris entre 0 et 1, généralement exprimé en pourcentage.

Dispositif	Rendement
éolienne	≤ 59 %
cellule photovoltaïque	20 %
réfrigérateur	40 %
chauffe-eau	90 %
lampe à incandescence	5 %
turbine hydraulique	90 %

$$\text{rendement} = \frac{\text{énergie utile transférée}}{\text{énergie totale reçue par le convertisseur}}$$

Exemple : bilan énergétique d'un chauffage solaire

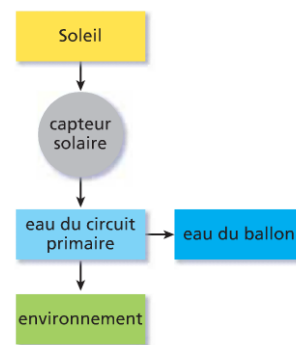


L'eau circulant dans le circuit primaire d'un chauffe-eau solaire utilise la puissance solaire reçue, estimée à  $2,2 \cdot 10^3 \text{ W}$ , pour chauffer les 200 L d'eau d'un ballon.

En une heure, l'eau du ballon passe de  $T_1 = 15^\circ\text{C}$  à  $T_2 = 22^\circ\text{C}$ . Quel est le rendement du chauffe-eau ?

On donne la capacité thermique de l'eau,  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Réponse :  $\eta = 0,85$ . L'énergie perdue (15 %) est transférée à l'environnement (tuyaux mal isolés, par exemple).



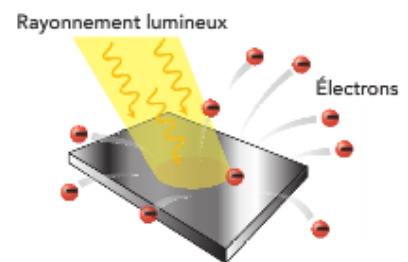
## 2 - Transferts d'énergie à l'échelle microscopique

La mécanique quantique est une théorie de la matière ayant de très nombreuses applications pratiques. L'une d'entre elles, le laser, est utilisée dans des domaines variés : comment cette lumière est-elle produite ?

### 2.1 – Introduction à la dualité onde-particule

#### 2.1.1 – Le double visage de la lumière

Les phénomènes de diffraction et d'interférences de la lumière s'expliquent par ses propriétés ondulatoires. Pourtant, en 1905, Albert Einstein (1879-1955) postule que l'énergie de la lumière est portée par des grains d'énergie (des *quanta* qu'on appellera **photons**) : il explique ainsi théoriquement l'effet photoélectrique (ci-contre) mis en évidence en 1887 par l'expérience de l'Allemand Heinrich HERTZ (1857-1894).



Actuellement, la lumière et plus généralement les ondes électromagnétiques sont décrites comme des flux de photons. Un photon est une particule non chargée, de masse nulle et se déplaçant à la vitesse de la lumière.

L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect particulaire et ondulatoire.

L'énergie d'un photon est

$$E = h \times \nu$$



avec  $E$  exprimée en joules (J),  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence de l'onde en hertz (Hz).

**Dans cette relation, l'énergie  $E$  représente l'aspect particulaire du photon et la fréquence  $\nu$  son aspect ondulatoire.** Dans le vide, l'onde associée au photon a une longueur d'onde  $\lambda$  exprimée en mètre par

$$E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

### 2.1.2 – Extrapolation à la matière

A toute particule matérielle, c'est-à-dire ayant une masse  $m$ , animée d'une vitesse  $v$  très inférieure à la célérité  $c$  de la lumière dans le vide, on associe une grandeur appelée quantité de mouvement dont la valeur, notée  $p$ , est définie par

$$p = m \times v$$

où  $p$  s'exprime en  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $m$  en  $\text{kg}$  et  $v$  en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

En 1923, le physicien français Louis de Broglie propose que la dualité onde-particule de la lumière s'applique aussi à toute particule matérielle : cela conduit à associer à toute particule, matérielle ou non, une longueur d'onde  $\lambda$  liée à sa quantité de mouvement par la relation de de Broglie,

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

où  $p$  est en  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s et  $\lambda$  en m.

Cette relation implique réciproquement que  $\lambda = \frac{h}{p}$  : pour que l'aspect ondulatoire de la matière se manifeste, la masse de la particule doit être relativement peu élevée ; c'est le cas pour les particules microscopiques comme l'électron ou le nucléon (proton, neutron).

Dans le cas contraire, la longueur d'onde associée est tellement faible qu'il n'existe aucun obstacle ou ouverture suffisamment petit pour pouvoir diffracter l'onde associée. L'aspect ondulatoire de cette particule de matière ne peut donc pas se manifester.

Exemple : calcul de la longueur d'onde d'une voiture de masse 1 t roulant à  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\sim 40 \text{ km/h}$ )

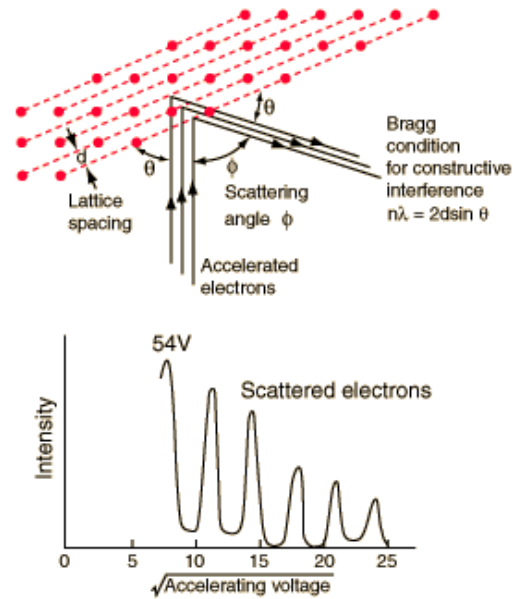
$$\lambda = \frac{h}{m \times v} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{10^3 \times 10} \sim 10^{-37} \text{ m}$$

### 2.1.3 – Des preuves aux applications

Trois ans après le postulat de de Broglie, Davisson et Germer réalisèrent une expérience de diffraction d'un faisceau d'électrons, prouvant leur caractère ondulatoire.



Clinton DAVISSON (1881-1958)  
Lester GERMER (1896-1971)

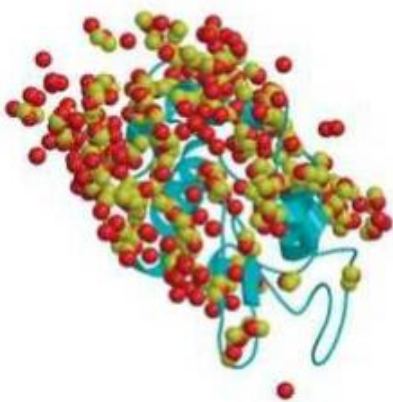


Par la suite, de nombreuses expériences ont confirmé ce résultat,

- la diffraction des neutrons (1946)
- les interférences entre atomes de néon froids (1992)
- les interférences entre fullerènes C<sub>60</sub> (1999)

Particule	Longueur d'onde usuelle (en m)	Édifice observé
électron	10 <sup>-11</sup> à 10 <sup>-12</sup>	cristal et molécule
neutron	10 <sup>-10</sup> à 10 <sup>-11</sup>	cristal
atome d'hélium	10 <sup>-10</sup>	atome

Aujourd'hui, les ondes de matière sont utilisées afin de sonder la matière à l'échelle des atomes et des molécules, par exemple dans les microscopes électroniques. En effet, les électrons mais aussi les neutrons et les atomes d'hélium qui interagissent avec la matière donnent des figures de diffraction qui permettent d'accéder à une image des molécules ou des réseaux cristallins étudiés.



Protéine de blanc d'œuf reconstituée par diffraction de neutrons.

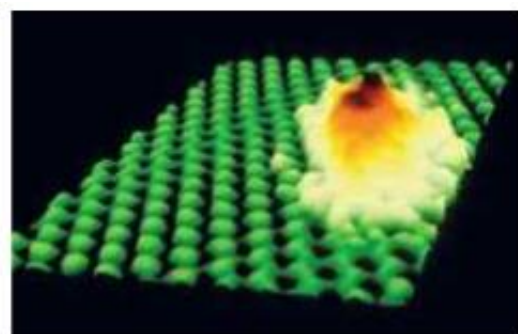
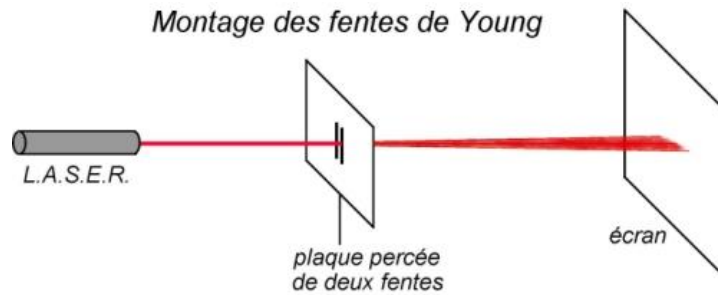


Image de microscopie électronique présentant des atomes d'or déposés à la surface d'atomes de carbone.

### 2.1.4 - L'essence insaisissable des objets quantiques

On éclaire des fentes d'Young avec une source lumineuse. Un écran placé derrière les fentes repère l'impact des photons.

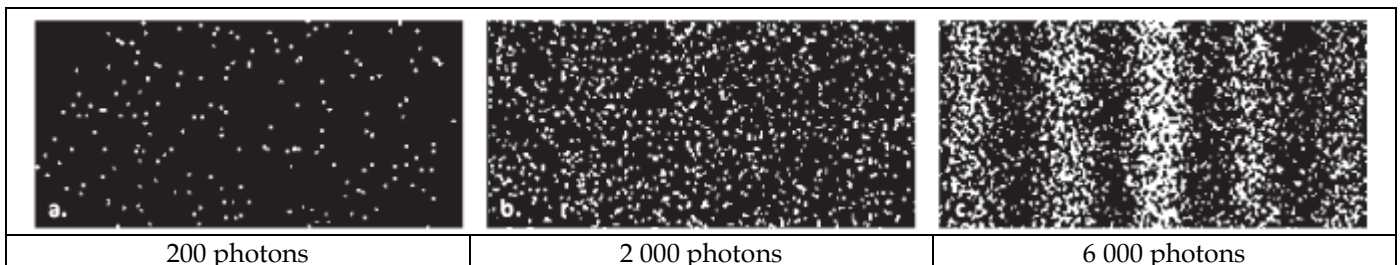


Quand on diminue suffisamment l'intensité de la lumière, les photons arrivent un par un sur les fentes. En raison de cette discontinuité, on parle de phénomène quantique.

C'est un paradoxe apparent : si un photon donné se comporte comme une particule lorsqu'il passe par une fente pour aller à l'écran, pourquoi le fait qu'il existe une autre fente influence-t-il sur son comportement ?

Le phénomène ne s'explique qu'en admettant que la lumière peut se comporter à la fois comme une onde et une particule.

On ne peut pas prévoir le lieu d'impact des photons sur l'écran, mais on peut établir la probabilité de les observer à un endroit précis. Pour un très grand nombre d'impacts, cette probabilité est maximale à certains endroits et minimale à d'autres. L'aspect probabiliste du phénomène est ainsi mis en évidence.



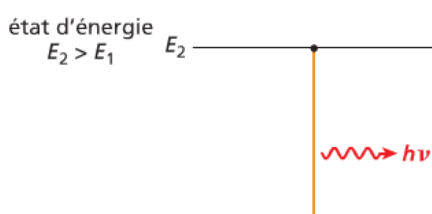
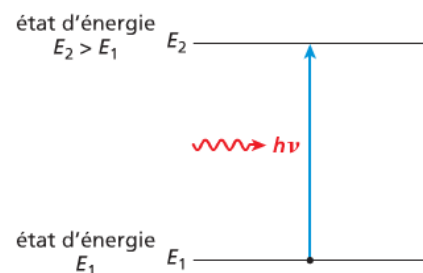
## 2.2 - Emission et absorption de photons par les atomes

### 2.2.1 - Des transitions énergétiques quantifiées

La matière peut absorber ou émettre des rayonnements électromagnétiques. Au niveau microscopique et quantique, cela correspond à l'absorption ou à l'émission de photons par les atomes, qui sont le siège de transitions énergétiques.

Il existe deux mécanismes de base,

L'**absorption** d'un photon se produit lorsque l'atome passe d'un état initial d'énergie  $E_1$  à un état d'énergie  $E_2$  supérieure.



L'émission spontanée d'un photon accompagne la désexcitation de l'atome, dont l'énergie descend de  $E_2$  à  $E_1$ .

L'énergie  $E = E_2 - E_1$  du photon et la fréquence  $\nu$  de la radiation associée au photon sont liés par la relation de Planck

$$E = h\nu$$

où la constante de proportionnalité  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s est la constante de Planck.

Exercice : calculer l'énergie (en électrons-volts) du photon associé à la radiation de longueur d'onde  $\lambda = 390$  nm.

Réponse :  $E = 3,19$  eV.

### 2.2.2 – Types de transitions d'énergie et domaines spectraux

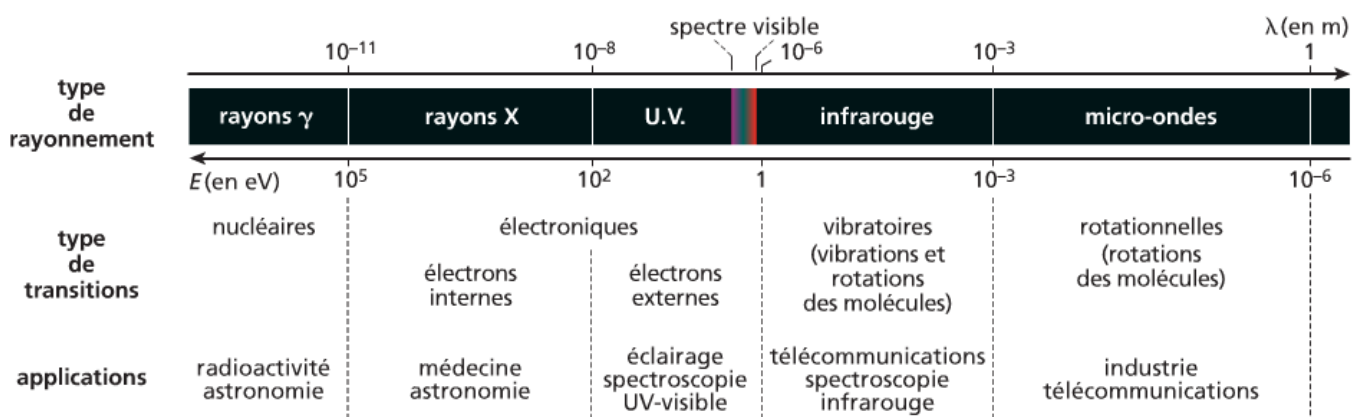
L'interaction de la lumière avec la matière est à l'origine de nombreux phénomènes électriques, magnétiques, optiques et chimiques observables dans notre environnement proche.

Au niveau de l'atome, l'interaction électrique entre les électrons et le noyau est à l'origine des transitions énergétiques électroniques.

Il existe d'autres interactions au sein de la matière, toutes associées à des transitions énergétiques :

- au sein des noyaux des atomes, c'est l'interaction nucléaire qui prévaut
- au sein des molécules, c'est l'interaction électrique entre les atomes qui agit

L'interaction lumière-matière se produit donc dans des domaines énergétiques variés, dont à des fréquences variées.



## 2.3 – La lumière laser

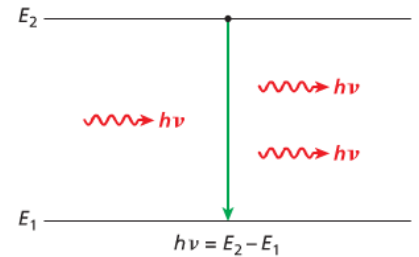
Le mot laser est créé à partir de l'anglais **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Cette expression explique le mode de production d'une telle lumière : l'amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement.

### 2.3.1 – Emission stimulée de photons

Soit un atome dans un état d'énergie  $E_2$ .

Sa désexcitation spontanée vers l'état d'énergie  $E_1$  produit un photon d'énergie  $E = E_2 - E_1$  associé à une radiation de fréquence  $\nu$  telle que  $E = h\nu$ .

Si cet atome est soumis à un rayonnement incident, de même fréquence  $\nu$ , il peut subir une désexcitation stimulée. Dans ce cas, le photon émis a toujours la même énergie  $E = h\nu$  mais il est de plus émis dans la même direction que le photon incident : on parle d'émission stimulée.



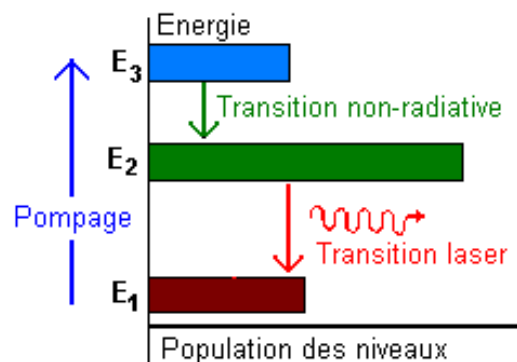
### 2.3.2 - Principe de fonctionnement du laser

#### 1<sup>ère</sup> étape : inversion de population par pompage optique

Pour obtenir un effet d'émission stimulée sur un grand nombre d'atomes, il faut faire en sorte qu'ils soient dans un niveau d'énergie excité  $E_2$ , et non dans leur niveau fondamental  $E_1$ .

On effectue ainsi une inversion de population (inversion, car les niveaux les plus peuplés sont habituellement ceux d'énergie moindre).

Cette opération est obtenue en fournissant de l'énergie aux atomes selon le procédé de pompage optique.



#### 2<sup>ème</sup> étape : amplification de la lumière

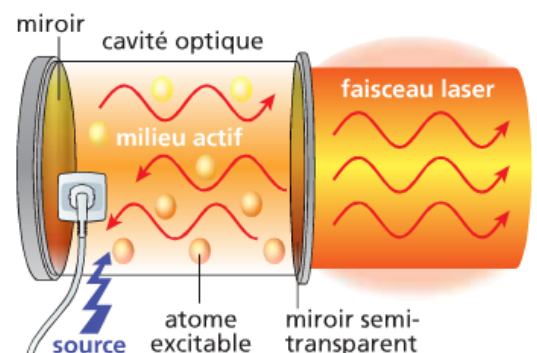
Un laser est un amplificateur de lumière fonctionnant grâce à l'émission stimulée.

Le milieu actif est un ensemble d'atomes qui subissent l'inversion de population et l'émission stimulée grâce à une source d'énergie extérieure.

Le milieu actif est placé dans une cavité entre deux miroirs parallèles disposés face à face.

Chaque photon fait plusieurs allers et retours, donnant lieu à un nombre important d'émissions stimulées.

L'un des deux miroirs étant semi-transparent, une partie du rayonnement s'échappe de la cavité et forme le rayon laser.



### 2.3.3 - Caractéristiques de la lumière laser



*Monochromaticité du faisceau*

La lumière laser n'est pas dispersée par un prisme et son spectre ne comporte qu'une seule raie : il s'agit d'une lumière monochromatique.

Les constructeurs indiquent toujours la longueur d'onde du laser dans le vide : pour un laser hélium-néon courant,  $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$ .

*Concentration spatiale et temporelle de l'énergie*

Le laser délivre un faisceau de lumière très directif.

La puissance du laser est donc concentrée sur une petite surface, même à très grande distance de la source.

Certains lasers émettent en continu, d'autres peuvent émettre de brèves impulsions, concentrant également l'énergie dans le temps.



**Comment évaluer l'intensité lumineuse d'un laser ?**

Un laser hélium-néon délivre un faisceau de puissance  $P = 2,0 \text{ mW}$  et de rayon  $r = 0,40 \text{ mm}$ . Déterminer la puissance lumineuse surfacique  $I$  du faisceau (son intensité lumineuse) et la comparer à celle de la lumière solaire (de l'ordre de  $1 \text{ kW.m}^{-2}$ ).

La section du faisceau laser est  $\pi r^2$  donc la puissance surfacique du faisceau est

$$I = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{\pi \times (0,40 \cdot 10^{-3})^2} = 4,0 \cdot 10^3 \text{ W.m}^{-2}$$

C'est le même ordre de grandeur que l'intensité lumineuse de la lumière solaire, d'où le danger pour les yeux !

## A l'aube du XX<sup>ème</sup> siècle, des physiciens dans le flou

### Du particulaire à l'ondulatoire

Après de nombreuses théories au sujet de la lumière, le Britannique Isaac NEWTON (1642-1727), fort de ses réussites dans d'autres domaines de la physique et des mathématiques, impose son modèle de la lumière au XVIII<sup>ème</sup> siècle. Pour lui, il s'agit d'un jet de particules qui diffèrent suivant la couleur de la lumière. On parle de « modèle particulaire ».

Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer le phénomène d'interférences. Pour les interpréter, le modèle ondulatoire est élaboré au XIX<sup>ème</sup> siècle à la suite des travaux du Britannique Thomas YOUNG (1773-1829) et du Français Augustin FRESNEL (1788-1827). Très vite, ce modèle prédomine pour atteindre son apogée en 1864 avec les travaux de l'Écossais James MAXWELL (1831-1879).

Pourtant, à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, la découverte de l'effet photoélectrique par l'Allemand Heinrich HERTZ (1857-1894) sème le doute : le caractère ondulatoire ne permet pas de l'expliquer.

### L'effet photoélectrique

Lorsqu'un métal est éclairé par un rayonnement ultraviolet, des électrons sont arrachés de sa surface. En revanche, si on utilise un rayonnement de plus grande longueur d'onde – donc de moins grande énergie – les électrons ne sont pas arrachés, même avec une durée d'exposition plus longue, ou avec une plus grande intensité.

### De l'ondulatoire au particulaire

Cette dernière observation va avoir de grandes conséquences sur la modélisation de la lumière. D'après le modèle ondulatoire, l'énergie transférée par rayonnement au système dépend de la durée d'exposition : ainsi, une exposition prolongée du métal au rayonnement devrait permettre d'accumuler suffisamment d'énergie pour arracher un électron quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement. Le modèle ondulatoire ne permet donc pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

En 1905, pour expliquer cet effet, Albert EINSTEIN (1879-1955) postule qu'un rayonnement est constitué de particules transportant des quanta d'énergie. En 1926, l'Américain Gilbert LEWIS (1875-1946) les nomme *photons*. Lors de l'effet photoélectrique, pour qu'un électron soit arraché, il faut que l'énergie du photon incident soit suffisante ; si ce n'est pas le cas, l'électron n'est pas arraché, quel que soit le nombre de photons incidents (i.e. l'intensité lumineuse).

### La dualité onde-corpuscule

Actuellement, suite aux travaux du Français Louis DE BROGLIE (1892-1987) en 1923, la lumière, et plus généralement les ondes électromagnétiques, sont décrites comme des flux de photons. Un photon se comporte soit comme une onde, soit comme une particule suivant le contexte expérimental considéré : on parle de dualité onde-particule. Un photon n'est ni une onde, ni une particule : c'est un objet quantique.

En 1921, c'est pour ses travaux sur l'effet photoélectrique que A. EINSTEIN reçoit le prix Nobel de Physique (et non pour ses travaux – certes immenses – en relativité, comme on le croit souvent). En 1929, L. DE BROGLIE le reçoit à son tour pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons.