

Séquence 8

Énergie, matière et rayonnement

Sommaire

1. Prérequis
2. Du microscopique au macroscopique
3. Transferts quantiques d'énergie
4. Aspect ondulatoire de la lumière
5. Pour clore la séquence



1

Prérequis

A

Prérequis pour le chapitre 2 : « Du macroscopique au microscopique »

1. Mole, nombre d'Avogadro

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y en a dans 12 grammes de carbone 12. Ce nombre est le nombre d'Avogadro $N_A = 6,02 \times 10^{23}$.

Test 1

Quelle est la quantité de matière contenue dans 1 mg d'oxyde d'uranium UO_2 ?

Combien de molécules contient cette quantité de matière ?

Test 2

Quelle est la masse de $1,2 \cdot 10^{21}$ atomes de plomb ?

Données Masses atomiques en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$: O = 16 ; U = 235 ; Pb = 207.

2. Radioactivité

a) Représentation symbolique du noyau d'un atome

${}_Z^AX$ avec A = nombre de nucléons
Z = nombre de protons

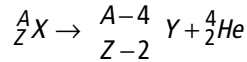
Des noyaux qui ont le même numéro atomique Z mais des nombres de nucléons différents A correspondent au même élément chimique. Ce sont des isotopes (ils ont donc le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent).

b) Réactions nucléaires

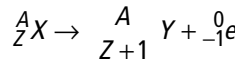
Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charges Z.

→ Les différentes radioactivités

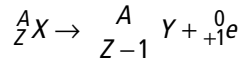
- Radioactivité α : le noyau se désintègre en émettant un noyau d'hélium



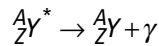
- Radioactivité β^- : le noyau se désintègre en émettant un électron.



- Radioactivité β^+ : le noyau se désintègre en émettant un électron positif encore appelé positon.



- Radioactivité γ : à la suite d'une désintégration α ou β , le noyau fils produit est souvent dans un état excité (Y^*). Il se désexcitera en émettant un rayonnement électromagnétique (de même type que la lumière) par l'intermédiaire de photons de très grande énergie : les photons γ .



Ayant une très grande énergie, ces photons sont très dangereux. Le rayonnement γ est très pénétrant, il est nécessaire de protéger les expérimentateurs par une couche de plomb de plusieurs centimètres d'épaisseur.

c) Décroissance radioactive

Le temps caractéristique T , noté encore $T_{1/2}$ d'une décroissance radioactive est le temps nécessaire pour que la population de noyaux de départ passe de N à $N/2$. T est appelé période radioactive et est une caractéristique de chaque élément radioactif.

Exemples

Élément	Symbole	$t_{1/2}$
Uranium 235	${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,4 \cdot 10^8$ ans
Radium	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 ans
Carbone 14	${}^{14}_6\text{C}$	5 730 ans
Polonium	${}^{210}_{84}\text{Po}$	138 jours

Définition

L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégrations par seconde. Il s'exprime en becquerels (Bq). $25\,000 \text{ Bq} = 25\,000$ désintégrations par seconde.

L'activité A d'une source ne contenant qu'un seul type de noyaux radioactifs est proportionnelle au nombre N de noyaux radioactifs qu'elle contient.

Test 3

On considère un échantillon de chacun des éléments du tableau ci-dessus ayant la même activité de 25 k Bq à l'instant $t = 0$.

- 1 Au bout de combien de périodes radioactives peut-on considérer qu'un élément a perdu sa radioactivité ? On considérera que la radioactivité de l'élément est négligeable lorsque son activité est inférieure à 1% de sa valeur initiale.
- 2 En supposant que chaque photon γ émis au cours d'une désintégration ait la même énergie pour chacun des éléments du tableau, classer ces éléments par ordre d'activité décroissante à $t = 100$ ans. Justifier ce classement.
- 3 On utilise le carbone 14 pour dater les vestiges préhistorique (bois, os...). Peut-on utiliser le carbone 14 pour dater des os de dinosaures ?

3. Énergie, travail, puissance

a) Travail d'une force constante

Une force $\vec{F}$ constante fournit un travail W sur le trajet rectiligne $\vec{L} = \overrightarrow{AB}$: $W = \vec{F} \cdot \vec{L}$ soit $W = F L \cos \alpha$. Si $\vec{F}$ et $\vec{L}$ sont colinéaires et dans le même sens, $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$ et $W = FL$.

En mécanique, en électricité et dans différents domaines de la physique, des forces travaillent, générant ou absorbant de l'énergie. L'énergie apparaît sous différentes formes (énergie cinétique, énergies potentielles) et se transfère d'une forme à une autre. L'énergie E s'exprime en joules dans le système SI.

Une énergie peut se manifester sur un temps Δt plus ou moins bref. Pour tenir compte de ce paramètre temps, on introduit une grandeur physique, la puissance

$$P : P = \frac{E}{\Delta t}$$

L'unité de puissance est le joule par seconde que l'on appelle watt (W).

Test 4

Un bœuf tire un attelage chargé. Il exerce une force $F = 2\,000$ N dans le sens du déplacement sur une longueur $L = 100$ m, qu'il parcourt pendant le temps $\Delta t = 2$ min. Calculer le travail et la puissance fournie par le bœuf.

Un condensateur emmagasine une énergie électrique $E = 0,02$ J. Cette énergie est transformée en énergie lumineuse dans un flash électronique. La durée de l'éclair est de 2 microsecondes. Calculer la puissance de l'éclair.

b) Structures des métaux et des isolants

Dans un métal, certains électrons sont liés et gravitent autour du noyau autour duquel ils appartiennent. D'autres dits électrons libres se déplacent librement à

l'intérieur du métal sans pouvoir en sortir. Ces électrons sont responsables de la conduction électrique.

Dans un isolant, il n'y a pas d'électrons libres.



Prérequis pour le chapitre 3 : « Transferts quantiques d'énergie »

1. Rayonnement électromagnétique, loi de Wien

Vous avez constaté qu'un corps chaud dégage de la chaleur, c'est-à-dire rayonne de l'énergie électromagnétique infrarouge même s'il n'émet aucune lumière visible.

D'après la théorie du corps noir, un corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique continu caractéristique de sa température. L'émission maximale a lieu pour une longueur d'onde λ_m liée à la température selon la loi de Wien

$$\lambda_m T = C_{ste} = 3 \times 10^{-2} \text{ m.K.}$$

La température doit être exprimée en mètres et la température en kelvins.

Test 5

La loi de Wien donne-t-elle la couleur d'un corps ?

On considère les spectres d'émissions de trois sources :

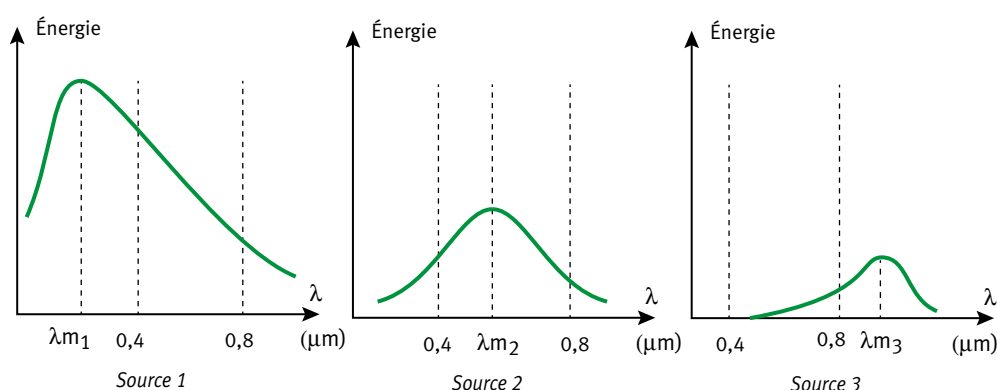


Figure 1 : Spectre d'émission de trois sources

Calculer la température T de chacune des trois sources dont on donne les longueurs d'onde correspondant au maximum de chaque spectre.

Source 1 : $\lambda_{m1} = 0,20 \mu m$; Source 2 : $\lambda_{m2} = 0,560 \mu m$; Source 3 : $\lambda_{m3} = 3,0 \mu m$.

On mesure la longueur d'onde du ciel par une belle journée d'été. On trouve $\lambda = 405 \text{ nm}$. Si l'on applique la loi de Wien, quelle serait la température du ciel ?

À l'analyse de ces exemples, peut-on répondre à la question : la loi de Wien donne-t-elle la couleur d'un corps ?

2. Niveaux d'énergie des atomes

L'étude des spectres d'émission et d'absorption d'un atome permet d'avoir des renseignements sur cet atome, en particulier sur les niveaux d'énergie des électrons dans cet atome.

Test 6

Lorsqu'on enregistre le spectre d'émission d'un atome, on observe des raies de différentes couleurs.

On mesure, pour l'atome d'hydrogène, quatre raies de longueurs d'onde :

- Raie rouge $\lambda_1 = 656,2 \text{ nm}$ (raie H_α)
- Raie bleue $\lambda_2 = 486,1 \text{ nm}$ (raie H_β)
- Raie violette $\lambda_3 = 434,0 \text{ nm}$ (raie H_γ)
- Raie violette $\lambda_4 = 410,1 \text{ nm}$ (raie H_δ)

- 1 Justifier que l'énergie des atomes soit quantifiée.
- 2 Rappeler l'équation de Planck liant la longueur d'onde émise lorsque l'électron passe d'un niveau d'énergie E_j au niveau E_i ($E_j > E_i$).
- 3 Les raies d'émission dans le visible correspondent aux transitions des niveaux E_3 , E_4 , E_5 et E_6 vers le niveau E_2 . L'énergie du niveau 2 vaut $E_2 = -3,4 \text{ eV}$. Calculer les énergies des niveaux E_3 à E_6 .
- 4 On donne pour le niveau fondamental $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. Justifier que la raie d'émission vers ce niveau n'est pas dans le domaine du visible.

Données Constante de Planck $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.



Prérequis pour le chapitre 4 : « Aspect ondulatoire de la lumière »

1. Aspect ondulatoire de la lumière

- Ondes à la surface de l'eau

Lançons une pierre dans un étang. Des ondes circulaires se propagent en s'élargissant sur la surface de l'eau. Un bouchon flottant à la surface oscille verticalement en restant sensiblement au même endroit quand il est atteint par les ondes et s'immobilise quand la surface redevient calme à l'endroit où il se trouve.



Figure 2 : Ondes circulaires

- Ondes périodiques sur une cuve à ondes

Dans une cuve à ondes, un stylet vertical frappe périodiquement la surface de l'eau. On observe une succession de vagues circulaires qui se propagent en s'élargissant. Un petit bouchon sur la surface oscille en restant sensiblement sur la même verticale. Compte tenu du caractère périodique de l'excitation, le mouvement du bouchon est également périodique. Il oscille à la même période T et à une amplitude a , dépendant de l'importance de l'excitation. La distance entre les sommets de deux vagues voisines est constante. C'est la longueur d'onde. λ est liée à la période T et à la célérité (vitesse de propagation) v de l'onde par la formule : $\lambda = vT$.

a , T et λ sont des grandeurs caractérisant l'onde qui se propage à la surface de l'eau.

- Une propriété des ondes est la diffraction

Ce phénomène est bien visible lorsqu'une onde incidente rencontre un obstacle de dimensions comparables à sa longueur d'onde. La diffraction permet aux ondes de contourner les obstacles. Elle explique, par exemple, que l'on puisse se parler de part et d'autre d'une porte ouverte, sans se voir et sans qu'il y ait de transmission du son à travers les murs.

- Une propriété des ondes est leur capacité à interférer

Ce phénomène a déjà été étudié dans le chapitre sur les ondes. Vous avez pu observer ce phénomène sur la cuve à ondes lorsqu'un front d'onde rectiligne arrive sur un obstacle percé de deux ouvertures. On observe à la sortie une onde résultante présentant des régions où elle oscille avec une amplitude maximale et d'autres où la surface est immobile.

Diffraction

À l'aide d'un moteur de recherche, taper **Caen diffraction surface de l'eau**.

Puis aller sur le site **diffraction à la surface de l'eau**.

Faire varier les paramètres proposés sur le site, en particulier le paramètre largeur de la fente. On constate que le phénomène de diffraction augmente lorsqu'on diminue la largeur de la fente.

Interférences

À l'aide d'un moteur de recherche, taper **Caen interférences surface de l'eau**.

Puis aller sur le site **interférences à la surface de l'eau**.

Faire varier les paramètres proposés sur le site. Observer qu'il y a certains points de la surface de l'eau qui sont totalement immobiles et d'autres qui vibrent avec une amplitude maximale

Test 7

Une onde mécanique circulaire se propageant sur un étang de célérité $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ et de fréquence 5 Hz rencontre un obstacle de largeur 5 m. Va-t-il y avoir diffraction ?

Même question avec un obstacle de largeur 50 cm.



Prérequis pour le chapitre 4 : « Microscope à force atomique »

1. Interactions intermoléculaires

Au sein d'une molécule, les atomes sont liés entre eux par des liaisons chimiques reposant sur l'interaction électromagnétique. Cette interaction attractive devient répulsive lorsque les atomes se rapprochent trop et que les nuages électroniques viennent au contact. Il existe donc une distance d'équilibre entre atomes d'une molécule.



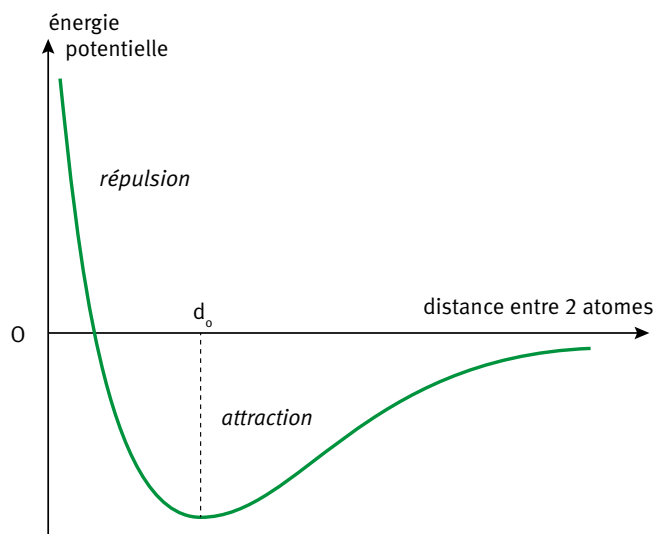


Figure 3

2. Polarité des molécules

Dans une molécule covalente, non symétrique, l'électronégativité différente des atomes entraîne une répartition dissymétrique des charges. La molécule possède alors un moment dipolaire $\vec{\mu}$ et permet à la molécule d'interagir avec des particules chargées (ions) ou d'autres molécules polaires.

Par exemple :

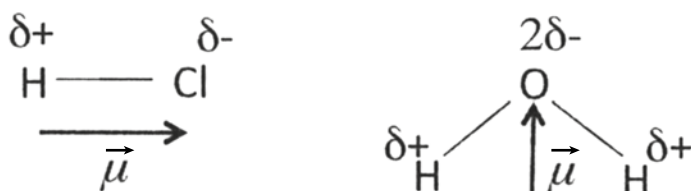


Figure 4

3. Mise en évidence expérimentale d'une interaction ions-molécule polaire

Charger par frottement sur un chiffon un corps de stylo à bille en matière plastique, puis l'approcher d'un filet d'eau à très faible débit. Vous constatez que le filet d'eau est dévié vers le stylo chargé électriquement, puis continue son trajet vertical. La déviation des molécules d'eau est due à l'interaction attractive ion-dipôle, les molécules possédant un moment dipolaire permanent.

Les interactions entre molécules sont attractives, toujours de courte portée. Elles décroissent en $\frac{1}{r^7}$ mais sont beaucoup plus importantes lorsqu'elles engagent des ions et des molécules polaires. Ces forces connues sous le nom de forces de Van Der Waals participent à la cohésion de la matière.



Prérequis pour le chapitre 5 : « Microscope électronique »

Accélération d'une particule dans un champ de forces

Quand cette particule est animée d'un mouvement circulaire uniforme, son accélération est $\vec{a} = \frac{v^2}{r} \vec{N}$ où $\vec{N}$ est le vecteur unitaire dirigé vers le centre du cercle.

Deuxième loi de Newton appliquée à une particule de masse m animée de la vitesse $\vec{v}$ dans un champ de forces :

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}$$

En mécanique, on appelle quantité de mouvement la grandeur $\vec{p} = m\vec{v}$.

Test 8

Dans l'atome d'hydrogène, un électron de masse m et de charge $-e$ est soumis de la part du noyau de charge $+e$ supposé immobile à une force électrique. Sous l'action de cette force, il effectue une trajectoire circulaire dont le noyau est le centre.

- 1 Montrer que la vitesse de l'électron est constante.
- 2 Comment s'exprime la vitesse en fonction du rayon.



2

Du microscopique au macroscopique

A

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Extraire et exploiter des informations sur un dispositif instrumental permettant de visualiser les atomes et les molécules.
- ▶ Évaluer les ordres de grandeur relatifs aux domaines macroscopique et microscopique.
- ▶ Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques.
- ▶ Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température d'un solide ou d'un liquide.
- ▶ Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique.
- ▶ Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces.
- ▶ Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

B

Pour débiter le chapitre

Le monde microscopique est un monde totalement différent du monde dans lequel nous vivons. Dans le plus petit grain de sable visible, le nombre d'atomes de silicium est gigantesque.

Activité 1



Données

Calculer le nombre de molécules H_2O dans une goutte d'eau de volume $v = 0,05 \text{ mL}$.

Masses atomiques en g.mol^{-1} : $O = 16$; $H = 1$, la masse volumique de l'eau $\rho = 1 \text{ g.mL}^{-1}$ et le nombre d'Avogadro $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

1. Détecteur de fumée ionique

Un détecteur de fumée ionique fonctionne sur le principe de l'ionisation de l'air. Une source radioactive ionise l'air entre deux électrodes de potentiel différent, ce qui génère un courant d'ions. Lorsque la fumée pénètre dans le détecteur de fumée, elle diminue la conductibilité de l'air ionisé et perturbe le courant d'ions, ce qui déclenche l'alarme.

Activité 2



On peut se demander si le risque n'est pas important d'avoir une source radioactive dans un détecteur de fumée placé à demeure dans une pièce de vie. La source ionisante est une source scellée d'américium 241. Elle a été choisie pour sa faible énergie en rayonnement gamma γ . Le rayonnement α étant confiné dans le petit volume de la chambre d'ionisation ne présente aucun danger. Les détecteurs de ce type vendus dans le commerce ont une activité de 24 000 Bq. Cette activité est produite par 0,2 microgramme d'américium. Le temps de demi-vie est de 240 ans.

- 1 Quelle sera l'activité de la source après 240 ans ?
- 2 Quel est le nombre d'atomes contenus dans les 0,2 microgramme de la source ?

Bien que cette source ne présente aucun danger, pouvez-vous donner une raison pour laquelle ce type de détecteur ionique a été interdit ? Une recherche sur Internet peut vous donner des informations.

2. Le microscope optique

Dans un microscope optique, une source d'ondes éclaire l'objet. Le rayonnement diffracté par l'objet que l'on veut observer est véhiculé au travers d'un système de lentilles optiques de l'objet vers un détecteur (œil, CCD...). Ce système donne une image agrandie de cet objet. La plus petite distance pouvant être perçue par l'œil ou tout autre détecteur sera, au mieux, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ émise par la source.

Activité 3



Rappeler le domaine de longueur d'onde de la lumière visible. En déduire la plus petite distance entre deux objets ponctuels perçue par l'œil. Quel phénomène physique limite la résolution à la longueur d'onde de la radiation utilisée ?

Dans certains microscopes de laboratoire, on intercale entre la source de lumière blanche et l'objet un filtre coloré en bleu. Justifier ce choix.

Parmi les objets suivants, quels sont ceux pouvant être observés par un microscope optique ?

Cellule de paramécie, molécule de méthanol, virus, particule de pollen.

3. Le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique

Nous disposons maintenant de techniques et d'appareils permettant de visualiser des atomes et des molécules, en particulier le microscope à effet tunnel (1982) et le microscope à force atomique (1985). Leurs inventeurs, G. Binnig et H. Rohrer, ont obtenu le prix Nobel de physique en 1986. Nous reviendrons en fin de chapitre sur le principe de fonctionnement de certains de ces microscopes :

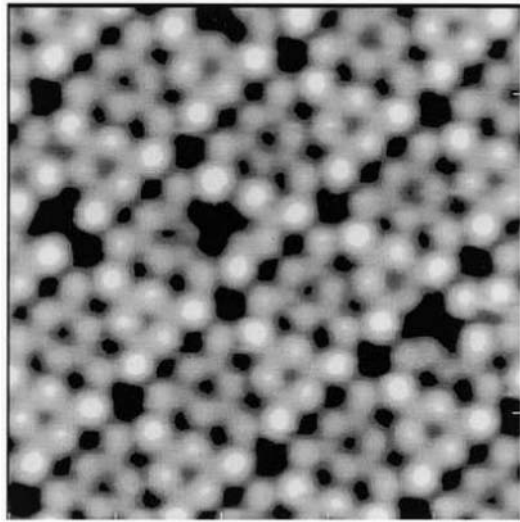


Figure 1 : *Image d'atomes de silicium à la surface d'un cristal de silicium obtenue avec un microscope à effet tunnel*

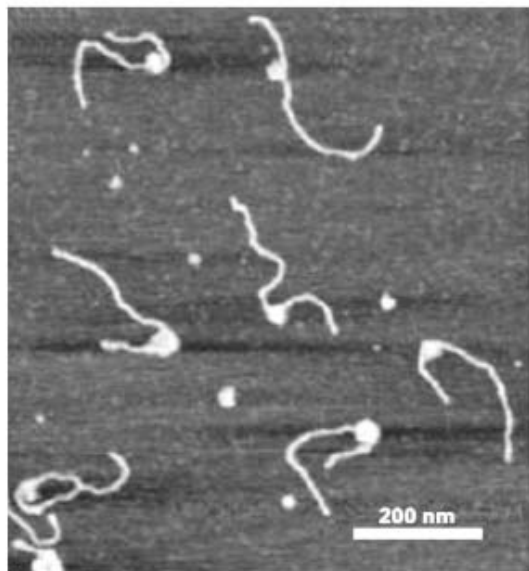


Figure 2 : *Image de brins d'ADN obtenus avec un microscope à force atomique*

4. La chambre à brouillard

La chambre à brouillard, inventée par le physicien écossais Wilson, en 1912, a eu un succès retentissant car elle a permis de visualiser les trajectoires des particules α et β émises par des sources radioactives.

La chambre à brouillard présentée ci-dessous, basée sur le principe de la chambre de Wilson permet de voir dans l'atmosphère les trajectoires des particules α et β émises par une source de radium de faible activité.

Dans une cuve de verre fermée dont le fond est maintenu à une température de -80°C environ, on a vaporisé du méthanol. Quand une particule α est éjectée à la vitesse de $20\,000\text{ km/s}$ d'une aiguille de radium faiblement radioactive, elle entre en collision avec les milliers de molécules d'air et de méthanol qu'elle rencontre. Ces chocs, violents à l'échelle microscopique, ionisent les molécules atteintes lors de ces chocs, et font perdre à la particule α toute son énergie cinétique sur une longueur de 8 à 10 cm. Dans la région épaisse de 1 cm, surmontant le fond de la cuve, très froide, la température variant entre -50 et -80 , les vapeurs de méthanol se condensent sur les ions formés. Il se forme instantanément de minuscules gouttelettes sur les ions, ce qui permet, avec un éclairage latéral, de voir ces gouttelettes, dans le sillage des particules. Le phénomène est identique lors de la condensation de la vapeur d'eau à la sortie des réacteurs d'un avion dans la haute atmosphère où la température est très basse.

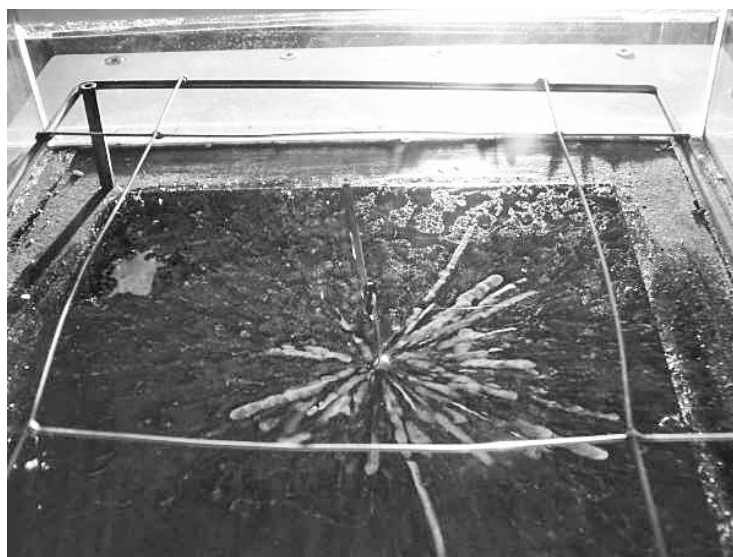


Figure 3 : *Traces laissées par les particules α émises par une source de radium de faible activité.* L'aiguille de radium est au centre de la figure. La plaque noire est maintenue à la température de -80°C . Les petites tiges métalliques que l'on peut voir sur la photographie sont portées à un potentiel de 400 V par rapport à la plaque.

Activité 4



Une particule α est éjectée de la source à la vitesse de $20\,000\text{ km/s}$.

- ① Calculer son énergie cinétique en joules puis en électron-volts.
- ② À chaque choc avec une molécule d'air ou de méthanol gazeux, la particule α perd 30 eV. Cette énergie perdue permet de créer une paire d'ions. Calculer le nombre de paires d'ions créées jusqu'à l'arrêt de la particule. Sur chaque ion il se forme une gouttelette de liquide qui diffusera la lumière émise par une lampe classique.

- 3 Pouvez-vous justifier l'utilité de porter les petites tiges métalliques à un potentiel de 400 V par rapport à la plaque métallique noire du fond de la cuve de la chambre à brouillard ?
- 4 Bien que le contraste de la photographie ne soit pas optimal, on peut observer des trajectoires minces et « tordues » dues aux particules β^- émises aussi par la source de radium. Les particules β^- ont une masse environ 7 200 fois plus petites que celle d'un noyau d'hélium. Leur vitesse à la sortie de la source est beaucoup plus grande. Pouvez-vous, par des arguments simples, justifier que les trajectoires des particules β^- ne sont pas rectilignes et beaucoup moins visibles que celles des particules.

Donnée $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.



Pour apprendre

1. Agitation thermique

Le physicien anglais Robert Brown réalisa, en 1827, l'expérience suivante. Il remarqua que des particules de pollen en solution dans l'eau étaient animées d'un mouvement incessant. Cette observation, réalisée un siècle et demi après les premières observations de bactéries et levures, en mouvement, s'apparente d'abord à un mouvement « vivant ». Mais ces particules de pollen sont parfaitement inertes. On comprend que, dans ce contexte historique, l'observation de cette découverte intrigua beaucoup les scientifiques de l'époque (Brown et ses collègues) et comment leur raisonnement s'est d'abord engagé dans cette voie du « vivant ».

Ce n'est qu'au début du xx^e siècle qu'Albert Einstein reconnut dans ce mouvement l'existence de molécules invisibles au microscope (les molécules d'eau) heurtant de façon aléatoire les grains de pollen.

Einstein considéra alors que le mouvement des grains de pollen pouvait se ramener à une marche au hasard : soumis aux **chocs incessants des molécules** d'eau, le grain de pollen produit de petits déplacements de direction et de longueur aléatoires.

Il s'agit ici de voir comment le modèle de la marche au hasard peut expliquer le processus de diffusion. Nous verrons comment le désordre microscopique génère un ordre macroscopique.

Activité 5



Faire la recherche suivante à l'aide d'un moteur de recherche comme Google : « Roussel mouvement Brownien ». Aller sur le site Diffusion brownienne.

- 1 Regarder l'animation 1 montrant le mouvement aléatoire d'une particule dans le plan.

Cette animation simule le mouvement d'une particule, la direction et le mouvement changeant de façon aléatoire après chaque choc contre une molécule d'eau.

Expliquer pourquoi le mouvement n'est que statistiquement isotrope (identique dans toutes les directions).



Figure 4 : *Mouvement aléatoire d'une particule dans le plan*

- 2 Regarder la simulation 2. On considère 5 000 particules browniennes situées initialement au centre du carré gris et effectuant chacune leur propre mouvement aléatoire. Justifier, au vu de cette animation, le caractère isotrope de la diffusion.
- 3 Citer quelques phénomènes où cet aspect microscopique permet d'expliquer le comportement de la matière à notre échelle.

Lorsque la température augmente, les chocs contre les particules de pollen sont plus violents et plus rapprochés dans le temps car la vitesse des molécules d'eau entre deux chocs est plus grande.

Einstein, en 1905, Jean Perrin et Paul Langevin, en 1908, ont permis de comprendre que ce mouvement était un mouvement d'agitation thermique dont l'intensité était proportionnelle à la température absolue T .

Dans un gaz enfermé dans un récipient, les molécules s'entrechoquent entre elles et sur les parois. Si l'on augmente la température en chauffant le gaz à volume constant, les molécules ont toujours un mouvement désordonné, mais leur vitesse augmente et les chocs sont plus violents. La moyenne des chocs sur les parois du récipient se traduit à notre échelle par une augmentation de la pression.

Expérience : Diffusion d'un colorant dans un verre d'eau

On laisse tomber, à l'instant $t = 0$, quelques gouttes de colorant dans deux verres d'eau, à des températures différentes. On constate après quelques minutes que la diffusion du colorant est plus rapide dans le verre de droite qui contient l'eau la plus chaude. Cette expérience montre que l'agitation thermique favorise la diffusion de colorant dans l'eau et ceci d'autant plus vite que la température est plus élevée.

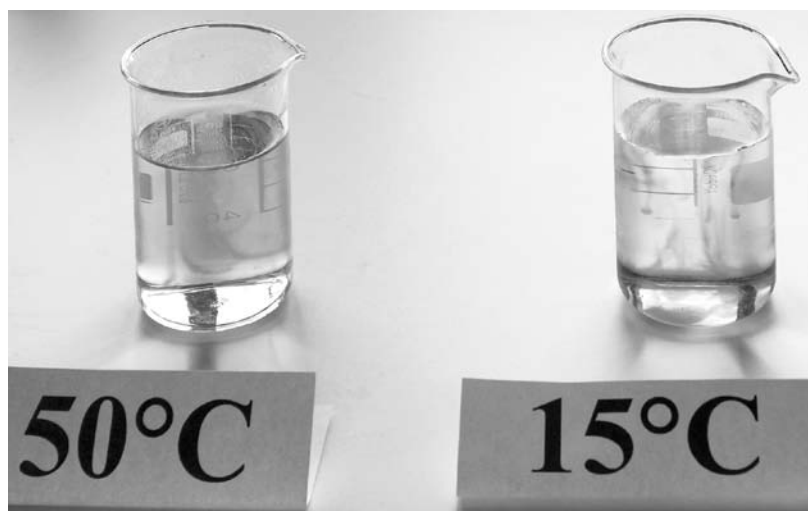


Figure 5 : Diffusion d'un colorant dans un verre d'eau

Ce mouvement d'**agitation thermique** permet de comprendre comment un gaz, un liquide ou un solide stocke l'énergie calorifique lorsqu'on le chauffe. La chaleur est stockée sous forme d'**énergie cinétique** d'agitation thermique par les molécules ou atomes qui constituent le système.

2. Transferts thermiques

Nous allons étudier dans ce paragraphe les trois types de transfert thermique.

a) Transfert par conduction

La conduction de la chaleur est le transport de chaleur des parties chaudes vers les parties plus froides du même corps sans mouvement de matière à l'échelle macroscopique.

Tenons par une extrémité une cuillère à café et plongeons l'autre extrémité dans de l'eau très chaude. La chaleur se propage de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide. La personne ne pourra pas tenir la cuillère longtemps car la chaleur se propage dans celle-ci et augmente sa température.

Si nous refaisons la même expérience avec une cuillère en bois, on pourra la tenir longtemps sans problème car la chaleur ne se propage pas.

Essayons de comprendre pourquoi un métal permet à la chaleur de se propager alors qu'une tige en bois ne le permet pas.

Il est intéressant de faire l'analogie avec la conduction de l'électricité.

	Métal	Bois
Conduit l'électricité	Oui	Non
Conduit la chaleur	Oui	Non

Nous savons que, dans un métal, il y a des électrons libres qui peuvent se déplacer librement au sein du métal. Ce sont ces électrons qui sont responsables de la conduction de l'électricité. Dans un morceau de bois, qui ne possède pas d'électrons libres, le courant ne passe pas. C'est un isolant.

Cette analogie de comportement pour la conduction de la chaleur permet d'expliquer comment la chaleur s'écoule dans un métal. À l'échelle microscopique, les électrons au contact de la source chaude absorbent l'énergie calorifique et la stockent sous forme d'énergie cinétique. La vitesse des électrons augmente. Ces électrons vont perdre cette énergie cinétique élevée au cours des chocs successifs contre les ions métalliques qui forment la structure rigide du métal. Ces ions vont eux-mêmes dissiper cette énergie reçue au cours des chocs sous forme de chaleur. Ainsi, **la chaleur se propage de proche en proche sans déplacement de matière** par ce mécanisme.

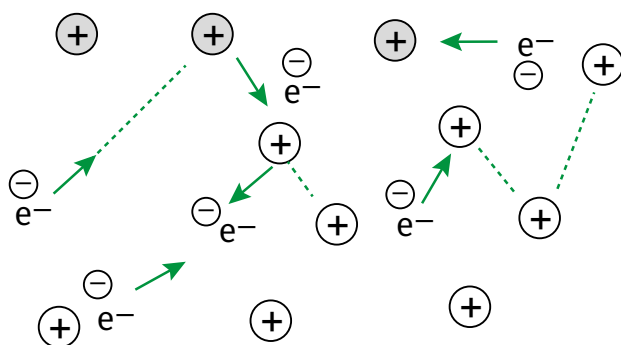


Figure 6 : Électrons libres dans un métal

b) Transfert par convection

Ce mode de transfert de chaleur implique **un déplacement de matière**. C'est un phénomène bien connu et exploité par les pilotes de planeurs et les oiseaux. Au pied des falaises, l'air chauffé par le soleil et la chaleur dégagée par les roches se dilate avec l'augmentation de température. **L'air chaud alors moins dense que l'air froid des couches plus élevées s'élève**. Ce mouvement vertical ascendant des couches d'air chaud transporte la chaleur vers les zones plus froides. L'air froid descend pour prendre la place de l'air chaud. Les masses d'air se mettent spontanément en mouvement, c'est le phénomène de **convection naturelle**.

Activité expérimentale

Mettez de l'eau froide dans une casserole et faites chauffer cette eau par le fond sur une cuisinière. Observez en regardant par-dessus et vous verrez l'eau se mettre en mouvement. La convection, par le brassage, égalise rapidement la température de toute la masse d'eau. La figure 7 montre la convection dans l'air à l'extrémité d'une cigarette, les particules microscopiques de carbone en suspension dans la fumée rendant visibles ses déplacements.



Figure 7 : Mouvement de convection d'une fumée de cigarette

Dans une installation de chauffage central urbain, on **force la convection** par une pompe pour transporter la chaleur de la production à l'utilisation.

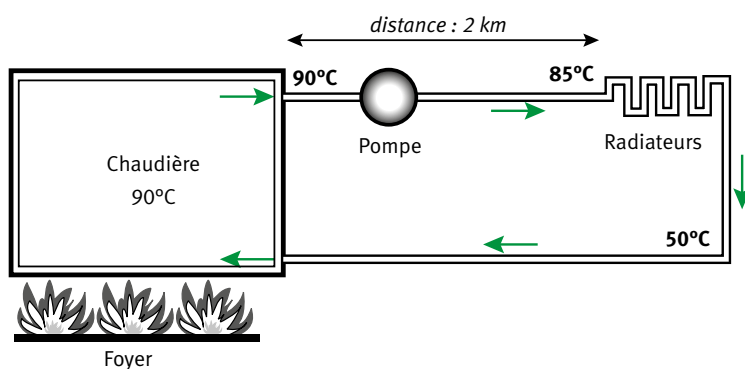


Figure 8 : Chauffage central : convection forcée

c) Transfert par rayonnement

Un corps chaud (le soleil, un radiateur électrique) émet un rayonnement électromagnétique, constitué de nombreuses radiations visibles, infrarouge, etc. La lumière que nous envoie le Soleil traverse une région vide de toute matière. **Contrairement aux transferts thermiques par conduction et par convection, qui nécessitent un support matériel, le transfert par rayonnement peut avoir lieu dans le vide.**

Expérience que l'on peut voir au Palais de la Découverte montrant le transfert de chaleur par rayonnement

On place deux miroirs paraboliques en face l'un de l'autre mais assez éloignés. Au foyer de l'un des miroirs, une flamme dégage de la chaleur par rayonnement. Ce rayonnement est renvoyé par le premier miroir vers l'autre miroir qui le refo-

calise vers son foyer. On peut comme cela enflammer de l'herbe sèche si elle est mise au foyer du deuxième miroir.

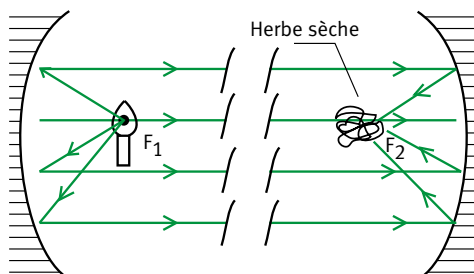


Figure 9 : Transfert par rayonnement

3. Résistance thermique

a) Loi des transferts de chaleur

Mettons en contact deux corps à des températures différentes. Le corps le plus chaud se refroidit au contact du corps le plus froid qui, lui, se réchauffe. **Le transfert de chaleur se fait toujours dans le sens des températures décroissantes.** Autre exemple qui amène au même constat : dans une maison, en hiver, il faut maintenir le chauffage, car il faut apporter constamment de la chaleur pour compenser la chaleur qui s'échappe à travers les murs et les fenêtres.

Le physicien français Joseph Fourier a établi les lois des échanges thermiques. Voyons sur un exemple.

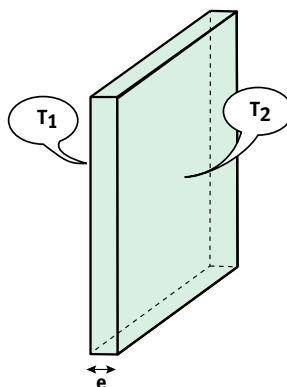


Figure 10

Considérons une plaque de verre plane de surface S et d'épaisseur e . Une des faces est maintenue à la température T_1 et l'autre à la température T_2 . Ces températures ne dépendant pas du temps, le régime est qualifié de permanent.

On mesure la quantité de chaleur Q qui traverse la plaque pendant le temps Δt .

Définition ϕ est le **flux thermique** (ou **puissance thermique**), c'est-à-dire la quantité de chaleur qui traverse la plaque par unité de temps.

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Joseph Fourier a montré qu'en régime permanent le **flux thermique** ϕ passant à travers une paroi **est proportionnel à la différence de température entre les deux faces de la paroi** $T_2 - T_1$.

b) Résistance thermique

Depuis la classe de 2^{de}, vous connaissez la loi d'Ohm. Si l'on applique une différence de potentiel $\Delta U = U_1 - U_2$ entre l'entrée et la sortie d'un fil conducteur, celui-ci est parcouru par un courant I . I s'exprime en ampères et correspond à la charge q qui traverse par seconde le conducteur. La loi d'Ohm est $\Delta U = RI$. $R = \frac{\Delta U}{I}$ est la résistance électrique.

Le courant électrique I à travers le matériau conducteur est proportionnel à la différence de potentiel ΔU .

Le flux de chaleur ϕ à travers la plaque de verre est proportionnel à la différence de température ΔT entre les deux faces de la plaque.

On définit, par analogie avec la résistance électrique, une résistance thermique $R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi}$ et la loi de Fourier énoncée au paragraphe précédent peut s'écrire sous la forme :

$$\phi = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}}$$

Activité 7



Faire une analyse dimensionnelle et montrer qu'une résistance thermique s'exprime en $K.W^{-1}$.

La résistance thermique d'une plaque de verre de surface S et d'épaisseur e est :

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \frac{e}{S}$$

λ caractérise le matériau à travers lequel s'écoule la chaleur. On l'appelle conductivité thermique du matériau.

Activité 8



① Faire une analyse dimensionnelle puis indiquer et montrer qu'une conductivité thermique s'exprime en $W.K^{-1}.m^{-1}$.

② Exprimer le flux de chaleur ϕ à travers une plaque de verre plane de surface S et d'épaisseur e , entre les faces de laquelle on maintient une différence de température $\Delta T = T_1 - T_2$.

Plus le matériau est isolant plus le flux de chaleur traversant ce matériau est faible.

③ On donne la conductivité de deux matériaux, l'un un métal très bon conducteur de la chaleur et l'autre d'un mauvais conducteur de la chaleur comme le verre :

$$\lambda_1 = 1,0 K.W^{-1}.m^{-1} \text{ et } \lambda_2 = 48,0 K.W^{-1}.m^{-1}.$$

Laquelle choisiriez-vous pour le verre ?

Remarque

Pour l'exemple précédent, on obtient $\phi = \lambda S \frac{\Delta T}{e}$. On constate que plus la surface S est grande, plus le flux est important, et pour une valeur fixée de S et ΔT , le flux sera d'autant plus grand que la vitre sera mince.

4. Énergie interne

a) Bilans d'énergie mécanique

Lançons un caillou en l'air. Il possède :

- une énergie potentielle dépendant à chaque instant de son altitude ;
- une énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} m v^2$.

Si le caillou descend sous l'effet de son poids, il perd de l'énergie potentielle et gagne de l'énergie cinétique. Ces deux variations sont quasiment égales en valeur absolue.

Considérons maintenant une arbalète. Elle a emmagasiné l'énergie qu'a dépensée l'archer pour la tendre sous forme d'énergie potentielle élastique.



Figure 11

Lorsqu'on libère la corde par un mécanisme approprié, cette énergie potentielle est transférée à la flèche sous forme d'énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} m v^2$.

On peut définir ainsi une grandeur énergétique constante appelée énergie mécanique : $E_m = E_c + E_p$.

Par contre, si on touche les différentes pièces mises en contact avec la flèche, on peut se rendre compte que leur température a légèrement augmenté. La relation précédente n'est donc pas tout à fait exacte dans ce cas et on a :

$$E_m = E_p + E_c + \text{chaleur}$$

Cette énergie transférée sous forme de chaleur existe également dans le premier exemple (caillou) mais elle est trop faible pour être observable facilement. Lorsque nous effectuons des bilans d'énergie, nous ne pouvons donc pas nous contenter de l'énergie mécanique mais nous devons également considérer les transferts thermiques (chaleur).

b) Notions d'énergie totale et d'énergie interne

Considérons un récipient rigide contenant de l'eau et lançons-le du haut d'un promontoire. Il va acquérir de l'énergie sous forme d'énergie cinétique, tandis que son énergie potentielle de pesanteur va diminuer.

On peut aussi, en le laissant immobile, lui apporter de l'énergie en le chauffant. Nous savons que le liquide va stocker cet apport d'énergie sous forme de chaleur en augmentant son agitation thermique, c'est-à-dire son énergie cinétique sous forme microscopique.

L'énergie cinétique microscopique, ici, est la somme des énergies cinétiques de chacune des molécules de liquide qui s'agitent en tous sens.

On appellera cette énergie microscopique, principalement ici sous forme d'énergie cinétique d'agitation thermique, énergie interne U .

L'énergie totale du système sera $E = U + E_m$.

U = énergie interne d'origine microscopique

$E_m = E_c + E_p$ d'origine macroscopique

Exemple Considérons le gaz sortant à grande vitesse ($v = 800 \text{ km/h}$) et à température élevée ($T = 1000^\circ\text{C}$) d'une tuyère d'avion à réaction. Prenons comme système une « tranche » de gaz de masse m comprise entre les deux plans P_1 et P_2 .

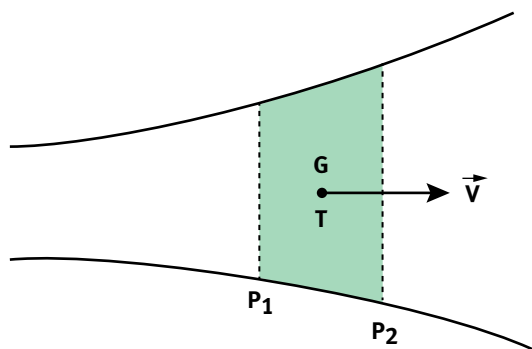


Figure 12 : Détente de gaz dans une tuyère

Il possède une énergie cinétique macroscopique $\frac{1}{2}mV^2$ où V est la vitesse du centre de gravité de la « tranche », et une énergie cinétique microscopique $E_{c \text{ micro}}$ d'agitation thermique liée à la température du gaz.

$U = E_{c \text{ micro}}$

$E_m = \frac{1}{2} m v^2 = E_{c \text{ macroscopique}}$, les autres formes d'énergie macroscopique, principalement sous forme d'énergie potentielle, étant négligeables devant la grande énergie cinétique du gaz à la sortie de la tuyère.

Donc $E = U + E_m = E_{c \text{ micro}} + E_{c \text{ macroscopique}}$

5. Chaleur et capacité thermique

Quand on chauffe de l'eau dans une casserole, plus la température doit être élevée, plus il faut fournir de chaleur. Plus la masse d'eau à chauffer est grande, plus il faut fournir de chaleur.

Si Q est la quantité de chaleur pour chauffer une masse m d'eau de la température T_1 à la température T_2 , Q est proportionnel à m et à $T_2 - T_1$.

$$Q = m \times c \times \Delta T = m \times c \times (T_2 - T_1)$$

c caractérise la matière que l'on chauffe, c'est la capacité thermique massique de matière. Cette grandeur correspond à la quantité d'énergie à fournir pour élever l'unité de masse de matière de un degré.

Unités Q en joules, m en kilogrammes, $q_2 - q_1$ variation de température en degrés ($^{\circ}\text{C}$).

Donc c s'exprime en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Remarques

- La variation de température $T_2 - T_1$ a la même valeur en degrés et en kelvins car

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273,15.$$

La capacité c pourra donc aussi être exprimée en $\text{A (X}_A, \text{Y}_A)$.

- On peut écrire aussi $Q = C(T_2 - T_1)$ où $C = mc$. C est la capacité thermique du système.

Activité 9



Capacités thermiques massiques de quelques matériaux exprimées en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 25°C

Fer	444
Cuivre	385
Plomb	336
Huile liquide	880
Sable	835
Verre	720
Béton	880
Eau liquide	4185

- 1 On peut remarquer une valeur élevée de la capacité thermique massique de l'eau. Voyez-vous une importance climatique importante de cette propriété ?

- ② À l'inverse, une famille de matériaux a une valeur très faible de capacité thermique massique. Donner son nom et proposer une explication de cette faible capacité thermique en utilisant l'interprétation microscopique de la chaleur.

6. Bilan énergétique d'un système physique

Lorsqu'on fait un bilan énergétique, il faut tout d'abord bien définir le système sur lequel on fait ce bilan. Considérons par exemple comme système de la vapeur d'eau enfermée dans un piston et portée à haute température dans une chaudière (figure 13).

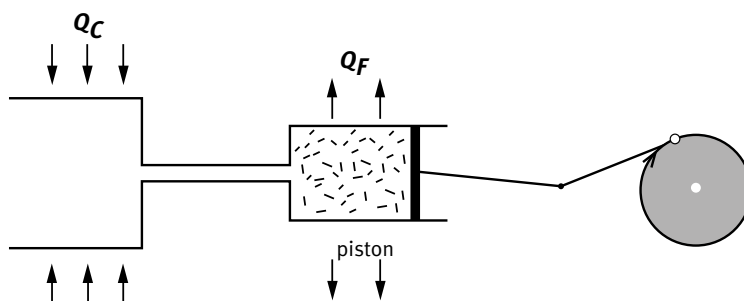


Figure 13

Ce gaz reçoit une quantité de chaleur Q_C de la source chaude (chaudière). Ensuite, en détendant dans le piston, il fournit un travail mécanique W qui fera avancer une machine. Au contact de l'extérieur considéré comme une source froide, cette vapeur va céder une quantité de chaleur Q_F . Au cours de cette évolution, l'état microscopique, c'est-à-dire son énergie interne U , aura varié. Elle sera passée de la valeur initiale U_1 à la valeur finale U_2 , traduisant une modification microscopique parfois complexe avec éventuellement un changement d'état physique.

On pourra ainsi écrire sous une forme plus pratique, entre autres pour les applications industrielles, le principe de conservation de l'énergie, principe qui ne se démontre pas (comme tout principe) et qui, à ce jour, a toujours été vérifié.

Avant d'écrire ce principe, on prendra comme convention de **compter positivement l'énergie reçue par le système** sous toutes ses formes et **négativement l'énergie rejetée à l'extérieur**. Il est donc extrêmement important de bien définir le système avant de faire un bilan.

Pour notre exemple, le système est la masse m de vapeur d'eau introduite dans le piston. Elle reçoit de la chaudière une quantité de chaleur Q_C ; donc $Q_C > 0$. À la sortie, étant à une température plus faible qu'au départ, mais encore plus élevée qu'à l'extérieur, elle va rejeter de la chaleur. Cette quantité de chaleur Q_F reçue par l'extérieur a été perdue par notre système. Donc Q_F est négatif vis-à-vis du système. En se détendant, le gaz fournit du travail mécanique à l'extérieur pour faire avancer la machine. Donc, vis-à-vis du système, W est négatif.

Les énergies sous toutes les formes échangées avec le système seront des grandeurs algébriques.

On peut alors écrire le principe de conservation de l'énergie sous la forme suivante :

Toute l'énergie que reçoit le système sert à augmenter son énergie interne.

$$\Delta U = \sum Q_i + \sum W_j$$

les grandeurs Q_i et W_j étant comptées algébriquement.

Dans notre exemple : $\Delta U = Q_C + Q_F + W$ avec $Q_C > 0$, $Q_F < 0$ et $W < 0$.

Activité 10



Un motocycliste descend, moteur éteint, une route rectiligne. La masse totale, conducteur plus machine, est $M = 100 \text{ kg}$. La portion de route, rectiligne, a une longueur $L = 100 \text{ m}$ et fait un angle de 15° avec l'horizontale. On donne les caractéristiques du mouvement, au départ (en haut de la pente) et à l'arrivée (en bas).

	Altitude (m)	Vitesse	E_p	E_c	E_m
Haut		36 km/h			
bas	0	18 km/h			

- Compléter le tableau : altitude, énergie cinétique, énergie potentielle et énergie mécanique.
- L'ensemble de freinage, constitué de deux freins à disques de masse totale $m = 200 \text{ g}$, est en acier de chaleur massique $c = 416 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. À la fin du freinage, la température de cet ensemble a augmenté de 115° .
 - Calculer l'augmentation d'énergie interne du système de freinage. D'où vient cette augmentation ?
 - Quelle quantité de chaleur a été évacuée dans l'air par la ventilation des freins ?
 - Quelle serait l'augmentation de température des freins si, en l'absence de ventilation, toute la chaleur de freinage avait été absorbée par les freins ?

**Donnée
numérique**

$g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.



Pour conclure

1. Résumé

Le monde microscopique, hors de portée de nos sens, est un monde totalement différent de celui dans lequel nous vivons. Le plus petit grain de sable, la plus petite goutte d'eau contient un nombre d'atomes ou de molécules gigantesque, dépassant plusieurs milliards de milliards.

L'Homme, afin d'agrandir le domaine de ses connaissances, a cherché à voir de ses propres yeux l'infiniment petit. À la fin du xvi^{e} siècle, le savant Galilée a été l'un

des premiers à inventer le microscope. Nous disposons maintenant de microscopes très performants, mais la microscopie optique a ses limites, liées aux propriétés de la lumière (diffraction).

Malgré cette limitation inhérente à la lumière, le physicien Robert Brown observa, au début du xix^{e} siècle, un phénomène étonnant, qui permit de commencer à comprendre le comportement des atomes et molécules à l'échelle atomique. Un liquide dans un verre nous paraîtra immobile, alors que les molécules le constituant sont animées d'un mouvement désordonné, dit mouvement d'agitation thermique, et cette agitation augmente avec la température.

L'énergie est maintenant un concept qui ne vous est pas inconnu. L'énergie existe sous plusieurs formes (cinétique, potentielle, élastique...) mais il est une forme d'énergie, la chaleur, qui est restée longtemps mystérieuse et que la connaissance du comportement des atomes à l'échelle microscopique a permis de comprendre. La chaleur est stockée par les molécules sous forme d'énergie cinétique d'agitation thermique.

Dès qu'il y a des écarts de températures entre deux endroits voisins, il y a transfert de chaleur. Ces transferts peuvent se faire sous trois types :

- Transfert de chaleur par conduction
- Transfert de chaleur par convection
- Transfert de chaleur par rayonnement.

L'Homme moderne est un grand consommateur d'énergie, mais celle-ci est chère. Aussi a-t-on développé des techniques pour, par exemple, isoler les bâtiments contre les pertes (onéreuses) d'énergie. La notion de résistance thermique permet de traiter les écoulements de chaleur comme un problème d'électricité.

Une différence de potentiel $V_2 - V_1$ aux bornes d'une résistance est la cause d'un courant électrique I à travers celle-ci. Loi d'Ohm :

$$V_2 - V_1 = RI$$

Une différence de température $T_2 - T_1$ de part et d'autre d'un mur est la cause d'un courant d'énergie (puissance thermique ϕ) à travers celui-ci. T_2 , T_1 et ϕ sont liés entre par une loi analogue à la loi d'Ohm de l'électricité :

$$T_2 - T_1 = R_{th} \phi$$

où R_{th} est une grandeur que l'on appelle résistance thermique. La résistance thermique dépend des dimensions et du type de matériau traversé par la chaleur.

La chaleur absorbée par un corps, qu'il soit solide, liquide ou gaz, verra sa température augmenter. Cette énergie d'origine microscopique, que l'on appelle énergie interne U , s'ajoutera à son énergie cinétique ou (et) potentielle d'origine macroscopique.

L'énergie totale d'un système est donc la somme de ses énergies microscopique et macroscopique :

$$E = U + E_c + E_p$$

On constate que certains corps absorbent plus la chaleur que d'autres. On caractérise cette aptitude à emmagasiner l'énergie calorifique par la capacité thermique de ce corps, notée C .

Pour une variation de température ΔT , l'énergie interne d'un corps de capacité thermique C augmentera de ΔU selon la relation :

$$\Delta U = C \Delta T$$

ou encore, si on est en présence d'un corps de masse m et de capacité thermique massique c :

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

c caractérise la matière que l'on chauffe, c'est la chaleur massique de la matière. Cette grandeur correspond à la quantité d'énergie à fournir pour élever l'unité de masse de matière de un degré.

Unités Q en joules, m en kilogrammes, $q_2 - q_1$ variation de température en $^{\circ}\text{C}$.

Donc c s'exprime en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

L'eau liquide est un corps de grande capacité thermique. Elle absorbe la chaleur solaire en été et la restitue en hiver. Elle joue un rôle modérateur dans les zones côtières, comme la Bretagne, où les hivers sont moins rigoureux que dans les régions continentales, comme la Bourgogne.

De même, on peut expliquer le climat exceptionnellement doux au bord du lac de Côme, l'un des plus grands lacs des Alpes italiennes, en Lombardie. Sa surface est de 140 km^2 et sa profondeur 410 m ; il a donc, avec toute l'eau qu'il contient, une grande capacité thermique.



Figure 14 : Lac de Côme, Isola Bella

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 1 Pertes thermiques

Pour mesurer les pertes thermiques à travers un bâtiment, on réalise une petite construction cubique d'arête $a = 2 \text{ m}$. Les quatre murs et le plafond sont en béton de $7,5 \text{ cm}$ d'épaisseur et de conductivité thermique $\lambda_1 = 1,5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Le sol sur lequel repose ce petit bâtiment est calorifugé ; on pourra donc négliger toute perte thermique par le sol.

À l'extérieur, les murs sont à la température constante $T_2 = 10^\circ\text{C}$. À l'intérieur, un radiateur de résistance $R = 10\ \Omega$, parcouru par un courant $I = 20\text{A}$, permet, lorsque l'équilibre thermique est atteint, de maintenir une température T_1 constante.

- ❶ Quel avantage présente une résistance électrique parcourue par un courant I constant pour fournir de la chaleur dans cette expérience ?
- ❷ Les dimensions de la construction, étant petites, permettent de considérer que les pertes thermiques sur chaque mur et le plafond, constitués du même matériau, de même épaisseur et de même surface, sont égales. Calculer le flux thermique à travers chaque paroi. Dans une maison de dimensions plus grandes, les pertes thermiques sont, à matériaux identiques, beaucoup plus grandes. Pouvez-vous donner une raison à ce constat ?
- ❸ Calculer la résistance thermique d'une paroi de béton aux dimensions ci-dessus. Quelle sera la température intérieure à l'équilibre thermique, c'est-à-dire quand l'apport compense les pertes ?
- ❹ Afin de limiter les pertes de chaleur, on isole de l'intérieur chaque paroi de béton par de la laine de verre que l'on plaque entre le béton et une cloison de plâtre.

Caractéristiques des constituants d'un mur isolé

	Épaisseur e	Surface S	Conductivité thermique
Béton	$e_1 = 7,5\text{ cm}$	4 m^2	$\lambda_1 = 1,5\text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
Laine de verre	$e_2 = 15\text{ cm}$	4 m^2	$\lambda_2 = 0,035\text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
Plâtre	$e_2 = 1\text{ cm}$	4 m^2	$\lambda_3 = 0,70\text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$

- ❺ Quel courant devra-t-on faire passer dans le radiateur électrique pour maintenir la même température θ_1 à l'intérieur ?

Exercice 2 Pompe à chaleur

Dans une pompe à chaleur, un fluide frigorigène parcourt un circuit fermé comprenant :

- Un échangeur qui absorbe une puissance thermique P_1 dans une nappe d'eau souterraine dont la température $\theta_1 = 7^\circ\text{C}$ reste sensiblement constante toute l'année.
- Un moteur électrique fournissant au fluide une puissance P pour le comprimer et le faire circuler.
- Une série de radiateurs à l'intérieur d'une maison, au contact desquels le fluide cède une puissance thermique P_2 pour maintenir une température constante $\theta_2 = 25^\circ\text{C}$.
- Un détendeur pour ramener le fluide frigorigène à basse pression. Le détendeur est une pièce sans parties mobiles qui n'échange aucune puissance avec l'extérieur.

P_1 , P_2 et P sont des grandeurs positives.

Le schéma de l'installation est représenté ci-dessous.

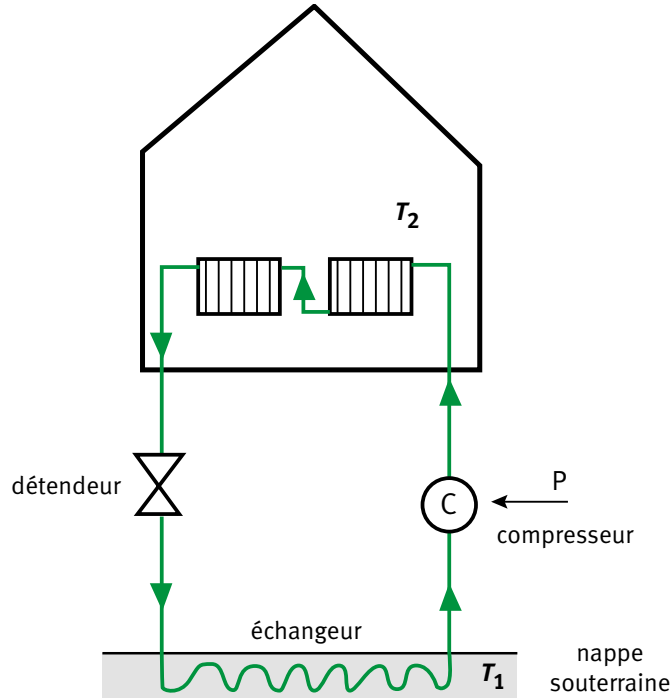


Figure 15 : Pompe à chaleur

Le système dont on va faire le bilan thermique est le fluide frigorigène, qui met le temps t pour effectuer un cycle (un tour complet). Toutes les grandeurs énergétiques sont des grandeurs algébriques, c'est-à-dire qu'elles sont comptées positivement quand elles sont effectivement reçues par le système et négativement quand elles sont cédées à l'extérieur du système.

Sur un cycle, exprimer :

- ❶ La quantité de chaleur Q_1 reçue algébriquement par le fluide au contact de l'échangeur ? Quel est son signe ? Justifier.
- ❷ La quantité de chaleur Q_2 reçue algébriquement par le fluide au contact des radiateurs ? Quel est son signe ? Justifier.
- ❸ Le travail mécanique W reçu algébriquement de la part du moteur. Quel est son signe ? Justifier.
- ❹ Faire un bilan énergétique sur un cycle en reliant la variation d'énergie interne ΔU aux grandeurs exprimées dans les trois questions précédentes.
- ❺ Après avoir fait un tour complet, les molécules de fluide se retrouvent dans les mêmes conditions de température et de pression. Que peut-on dire de la valeur numérique de ΔU ?
Quelle relation lie alors P , P_1 et P_2 ?
- ❻ Les mesures faites sur la pompe à chaleur en régime permanent donnent :
 $P = 5 \text{ kW}$, $P_2 = 55 \text{ kW}$.

Le propriétaire de la pompe ne dépense que l'énergie nécessaire pour faire marcher le compresseur. C'est la dépense. La recette est la chaleur que l'on récupère dans la maison.

Pour une pompe à chaleur, on définit une grandeur e que l'on appelle efficacité :

$$e = \frac{\text{recette}}{\text{dépense}}$$

Exprimer e en fonction de deux des trois puissances. Calculer sa valeur numérique.

- ⑦ Essayons de comprendre la signification physique de l'efficacité. Si l'on utilise un chauffage électrique et que l'on a besoin pour maintenir les pièces d'une maison à température constante, quelle puissance électrique devrez-vous payer à EDF pour fournir un kW en puissance thermique ?
En payant la même somme pour faire « tourner » la pompe à chaleur ci-dessus, quelle puissance thermique récupérerez-vous ? Conclusion ?

Exercice 3 Dans une centrale thermique, il y a :

- Une chaudière dans laquelle on brûle du charbon pour porter de l'eau à l'état de vapeur à haute température et haute pression.
- Une turbine dans laquelle la vapeur d'eau se détend pour faire tourner la turbine. La turbine est couplée à un alternateur qui crée de l'énergie électrique.
- Un condenseur où l'eau est récupérée à l'état liquide et à basse pression, avant d'être renvoyée à la chaudière.

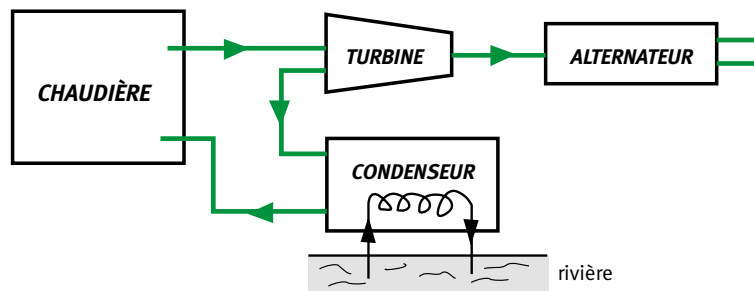


Figure 16 : Centrale thermique

- ① Donner la chaîne de transformation de l'énergie entre l'entrée de la turbine et la sortie de l'alternateur.
- ② Le rendement de l'alternateur est $r_A = 1$, celui de la turbine est $r_T = 0,84$. La puissance électrique fournie par l'alternateur est de 1 000 MW. La puissance thermique de la chaudière vaut $P_C = 3\,400\text{ MW}$.
Quelle est la puissance thermique fournie par la vapeur dans la turbine ?
- ③ On fournit de l'énergie, qui a un coût, dans la chaudière. On récupère de l'énergie électrique à la sortie de l'alternateur que l'on peut vendre à des utilisateurs extérieurs. Comment définiriez-vous le rendement de cette centrale ?
Quelle est sa valeur ?

- 4 L'eau fait un cycle fermé. Elle sort à une température T_C de la chaudière, subit une détente dans la turbine, où elle cède de l'énergie, elle arrive à une température basse dans le condenseur, puis retourne dans la chaudière, d'où elle ressort à la température T_C .
Après un cycle (un tour complet), que peut-on dire de la variation d'énergie interne de l'eau ?
De ce constat, peut-on calculer la puissance thermique rejetée dans le condenseur, que l'on appelle aussi source froide ? Si oui, calculer cette puissance P_F .
- 5 Calculer la capacité thermique de 1 m^3 d'eau.
- 6 Afin de maintenir la température du condenseur constante, on fait circuler, à l'intérieur du condenseur, dans un serpentin, de l'eau d'une rivière. Pour des raisons écologiques, l'augmentation de température de l'eau de la rivière à la sortie du serpentin est limitée à 10 degrés. Quel doit être le débit D de l'eau pour que cette condition soit vérifiée ? On fera pour cela un bilan sur le condenseur. Quel est le type de transfert qui se produit entre l'eau du condenseur et l'eau du serpentin : conduction, convection ou rayonnement ?

**Donnée
numérique**

Chaleur massique de l'eau : $c = 4\,180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

3

Transferts quantiques d'énergie

A

Objectifs d'apprentissage

- Connaître le principe de l'émission stimulée.
- Connaître les principales propriétés du laser.
- Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.

B

Pour débiter le chapitre

Interaction lumière/atome

Pour comprendre le fonctionnement d'un laser, il nous faut, au préalable, rappeler et compléter quelques connaissances que nous avons sur l'interaction entre une onde lumineuse et un atome ou une molécule.

• Émission spontanée

Supposons un atome ou une molécule dans un état excité d'énergie E_j . Cet état est instable pour l'atome. Il redescend spontanément à un niveau d'énergie inférieur E_i en émettant, sous forme de lumière, une énergie caractéristique E (un photon) de valeur correspondant à l'écart entre les deux niveaux.

$$E = E_j - E_i$$

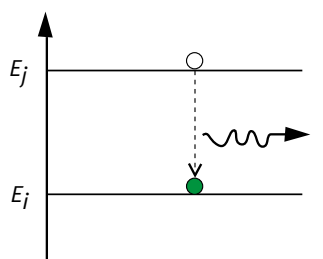


Figure 17 : Émission spontanée

Un photon peut être considéré comme un paquet d'ondes lumineuses dont la fréquence ν est donnée par la relation fondamentale de Planck :

$$h\nu = E_j - E_i$$

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

• Absorption

De la même façon, cette molécule peut passer de son niveau fondamental d'énergie E_1 à un niveau excité d'énergie E_j en absorbant un photon dont l'énergie E correspond à l'écart entre les deux niveaux.

$$E = E_j - E_1$$

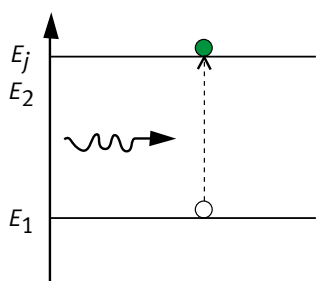


Figure 18 : Absorption

Remarque

L'émission spontanée se produit dans n'importe quelle direction de l'espace.

Einstein, en 1917, évoque, dans un article très en avance sur son temps, une troisième possibilité d'interaction entre la matière et la lumière : l'émission stimulée.

• Émission stimulée

Considérons un milieu dans lequel des atomes se trouvent dans un état excité de niveau E_3 .

L'émission stimulée correspondra au phénomène où un photon d'énergie $E = E_3 - E_2$ présent dans le milieu provoquera ou stimulera l'émission d'un autre photon en désexcitant un atome du niveau E_3 au niveau E_2 .

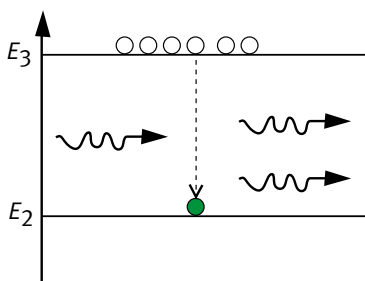


Figure 19 : Émission stimulée

Ce second photon émis, appelons-le photon jumeau, a toutes les caractéristiques du premier photon. Il aura la même fréquence, la même direction de propagation et la même phase.

Que veut dire « même phase » ? Les ondes lumineuses associées à ces photons oscillent en même temps et sont synchronisées, comme le montre la figure 20. Cette propriété s'appelle la cohérence. Nous l'avons déjà rencontrée dans la séquence 1 (chapitre 5 ; paragraphe B1) : il était montré l'impossibilité d'obtenir des interférences à partir de deux sources laser émettant des faisceaux lumineux monochromatiques de même longueur d'onde car les ondes émises n'étaient pas cohérentes entre elles.

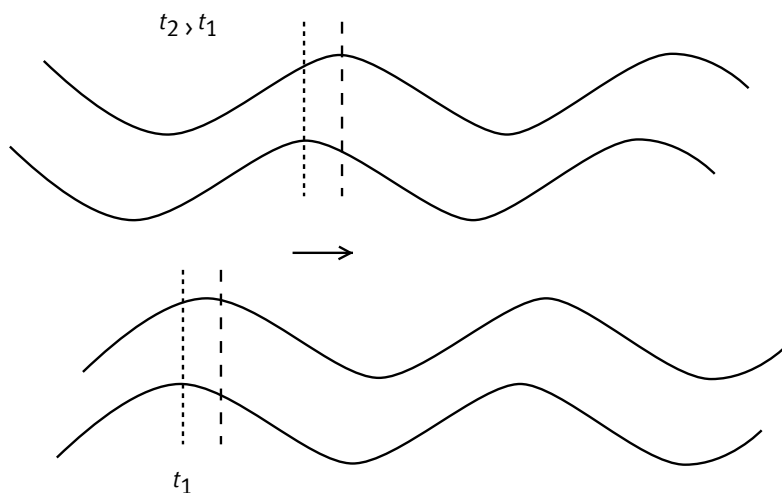


Figure 20 : Deux ondes cohérentes à deux instants

Ces deux photons donnent à leur tour naissance à deux nouveaux photons induits. Cela donne très vite à cette émission un caractère très directif, très intense et parfaitement défini en fréquence et en longueur d'onde.

C'est une émission stimulée par l'onde incidente, d'où le nom d'émission stimulée. Sans la présence d'une onde lumineuse incidente, ce type d'émission n'existe pas.

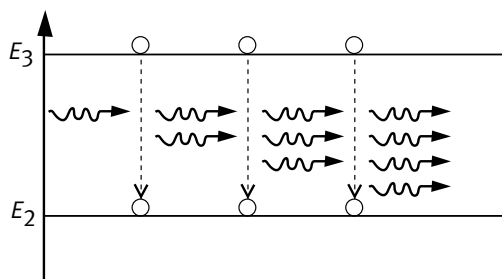


Figure 21 : Émission stimulée

Cette émission sera fondamentale dans l'effet laser. Un laser utilise l'émission stimulée pour amplifier une onde lumineuse. Le mot LASER est un acronyme pour « Light Amplification by **Stimulated Emission** of Radiation ».



Pour apprendre

Si l'on arrive à entretenir l'émission stimulée, on pourra créer une amplification de la lumière dans une direction unique.

Quels sont les problèmes à surmonter pour faire un laser ?

Peut-on faire un laser avec n'importe quel atome ?

1. Population des niveaux d'énergie

Supposons que nous disposions d'un très grand nombre d'atomes identiques en équilibre thermique.

Un constat : tous les atomes ne sont pas dans leur état fondamental d'énergie. Le physicien Boltzmann a montré que :

- ▶ La population la plus nombreuse est celle du niveau énergétique le plus bas, donc le plus stable.
- ▶ La population à un niveau donné est toujours plus faible que celle des niveaux inférieurs.
- ▶ Une équation (l'équation de Boltzmann : hors programme) permet de connaître le nombre d'atomes à un niveau donné. Globalement, la population des niveaux diminue lorsque l'énergie du niveau augmente, et cette variation est exponentielle (donc rapide).

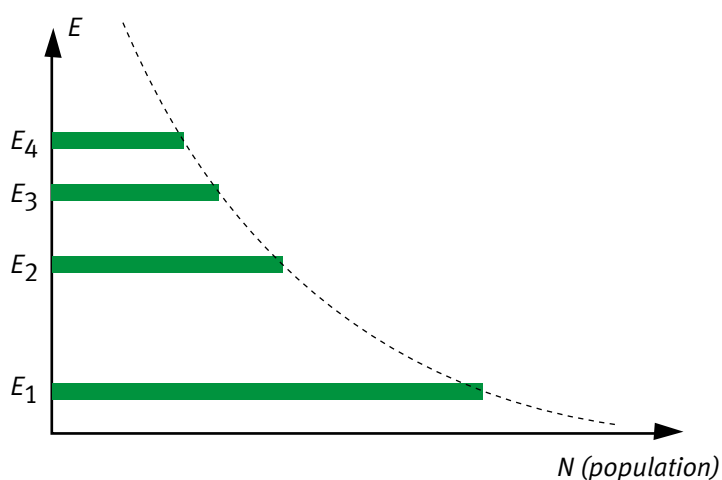


Figure 22 : Occupation des niveaux d'énergie

Exemple Considérons deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 distants de 0,5 eV à la température ambiante ($27\text{ }^{\circ}\text{C} = 300\text{ K}$).

Si, au niveau fondamental E_1 , le plus bas, nous avons par exemple un milliard d'atomes, $N_1 = 10^9$, alors, au niveau supérieur E_2 , la population de ce niveau sera $N_2 = 4$.

Vu les différences gigantesques de population sur les deux niveaux, l'absorption l'emportera sur l'émission stimulée. Un photon sera absorbé pour chaque atome qui passera à un niveau d'énergie supérieur. Il y aura donc **atténuation du faisceau lumineux** qui traversera le milieu.

2. Pompage optique

a) Que faut-il pour que le faisceau laser soit amplifié et non atténué ?

Il faut que l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption.

Plus il y a d'atomes dans l'état fondamental, plus il y aura d'atomes qui pourront aller dans un état excité en absorbant un photon. De même, plus il y aura d'atomes dans un état excité, plus il y aura de photons émis quand ceux-ci redescendront dans un état inférieur.

En conclusion, l'émission ou l'absorption est proportionnelle à la population sur le niveau de départ.

Il faudra donc, pour avoir une amplification du faisceau, **inverser les populations des niveaux**, c'est-à-dire peupler les niveaux plus élevés en dépeuplant les niveaux inférieurs.

Alors l'émission stimulée l'emportera sur l'absorption et le faisceau sera amplifié.

L'inversion de population, condition nécessaire pour obtenir l'effet laser, nécessite un **apport d'énergie très rapide**. Le procédé d'inversion est appelé **pompage**. Il existe de nos jours de nombreux types de lasers ayant chacun leur procédé de pompage. Nous ne les mentionnerons pas tous mais, pour les principaux, on a :

- pompage optique : excitation des atomes par une source lumineuse intense ;
- pompage par décharges électriques ;
- pompage par passage de courant.

Le pompage optique a été inventé par le physicien français Alfred Kastler, invention pour laquelle il a obtenu le prix Nobel de physique en 1956.

b) Peut-on faire un laser avec n'importe quel atome ?

Le problème de l'inversion de population étant résolu, peut-on faire un laser avec n'importe quel atome ? La réponse est non. Expliquons pourquoi.

Il ne faut pas, quand on fait passer un grand nombre d'atomes sur le niveau d'énergie supérieur, les laisser retomber spontanément au niveau d'énergie inférieure.

rier. Or, pour la majorité des atomes, c'est ce qu'il se passe : **l'émission spontanée** dépeuple aussitôt le niveau qui vient d'être « chargé ».

Heureusement, il existe des éléments qui possèdent des états que l'on appelle « **métastables** » pour lesquels l'émission spontanée est très faible sur certains niveaux d'énergie. C'est sur ces niveaux que l'on cherche à stocker beaucoup d'atomes avant de les forcer à un niveau inférieur par émission stimulée.

C'est ce que l'on a réalisé avec le laser à rubis, un laser dit à trois niveaux.

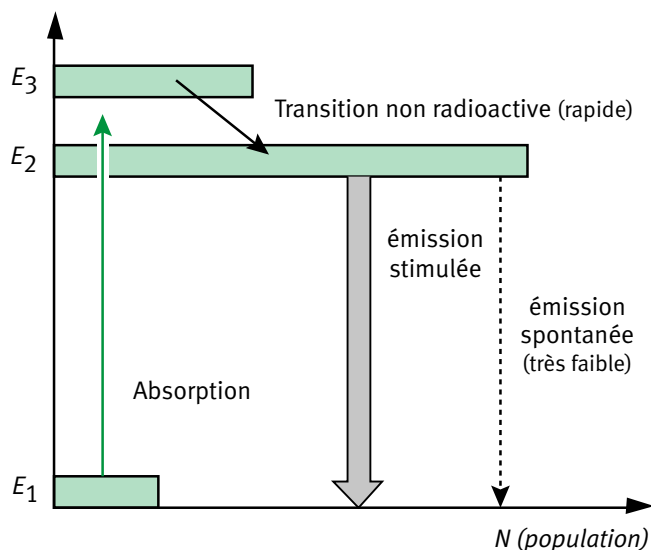


Figure 23 : *Laser à rubis, à trois niveaux*

Le pompage optique a lieu du niveau E_1 au niveau E_3 . Ensuite, les atomes passent du niveau E_3 au niveau E_2 par une transition non radiative, c'est-à-dire sans émission de lumière. Le niveau E_2 est un niveau métastable, permettant de stocker les atomes pour réaliser l'inversion de population et pour lequel l'émission spontanée est peu probable.

3. La cavité résonante

Le milieu actif rendu amplificateur par un mécanisme de pompage est inséré dans une cavité constituée de deux miroirs plans parallèles. Enfermée entre ces miroirs, la lumière fait de multiples allers et retours ; l'émission stimulée se reproduit des milliards de fois. L'un des miroirs qui n'est pas complètement réfléchissant (coefficient de réflexion en énergie $R = 99,99\%$) laisse échapper le faisceau laser.

Cette cavité doit avoir une longueur multiple de $\frac{\lambda}{2}$ où λ est la longueur d'onde de la radiation émise. On retrouve cette condition dans tous les systèmes générant des ondes stationnaires.

Activité 11



Document : étude d'un laser He-Ne d'après « Cavity optique et faisceaux gaussiens »

(Yannick Dumeige et Jean-Francois Roch, 18 novembre 2002)

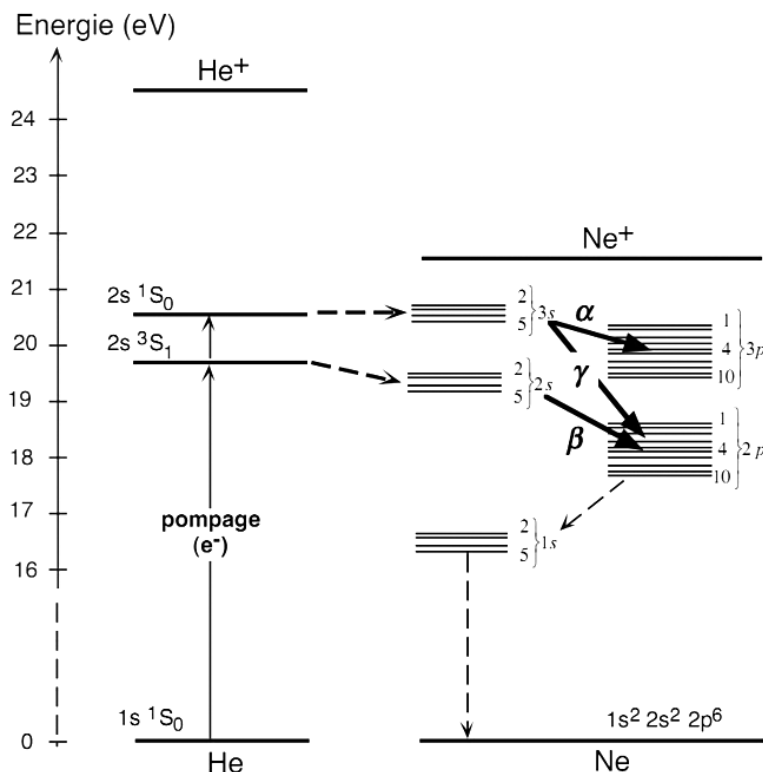


Figure 24 : Niveaux d'énergie des atomes He et Ne, et principales raies laser possibles représentées en flèches grasses

On remarquera la coïncidence entre les niveaux $2s^1S$ et $2s^3S$ de l'hélium et les niveaux $2s$ et $3s$ du néon. Les différentes raies situées dans le domaine visible correspondent à des transitions entre les sous-niveaux des groupes $3s$, $2s$ et $2p$ et $3p$ du néon. La transition la plus intense $3S_2 \rightarrow 2P_4$ correspond à la raie rouge à $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ bien connue de ce laser. Les He-Ne verts fonctionnent sur la raie à $\lambda = 543,5 \text{ nm}$ sur laquelle le gain optique est le plus faible. Le premier laser He-Ne construit en 1961 par Ali Javan aux Bell Labs (Murray Hill, NJ) [1] fonctionnait sur la raie à $1,15 \text{ mm}$. L'effet laser sur la raie rouge fut démontrée une année plus tard [2].

Bien qu'il ne constitue pas lui-même le milieu actif, l'hélium joue un rôle essentiel dans le processus de pompage optique qui aboutit à la création de l'inversion de population entre les niveaux précédents. Les chocs des électrons sur les atomes d'hélium portent ceux-ci dans les deux niveaux métastables $2s^3S_1$ et $2s^1S_0$. Ces niveaux ont des énergies qui coïncident sensiblement avec celles des niveaux $2s$ et $2p$ de l'atome de néon. Un processus d'échange d'énergie par collision résonante permet de peupler ces niveaux, ce qui réalise à travers quatre étapes l'inversion de population nécessaire pour l'obtention du gain laser.

La figure 25 donne les différents niveaux d'énergie de l'ion Ne^+ . On constate que la répartition des niveaux est plus complexe que pour l'atome d'hydrogène car, à la différence de ce dernier élément, l'ion sodium Na^+ possède 10 électrons. Sur cette figure, nous donnons les trois principales raies d'émission à partir de niveaux métastables.

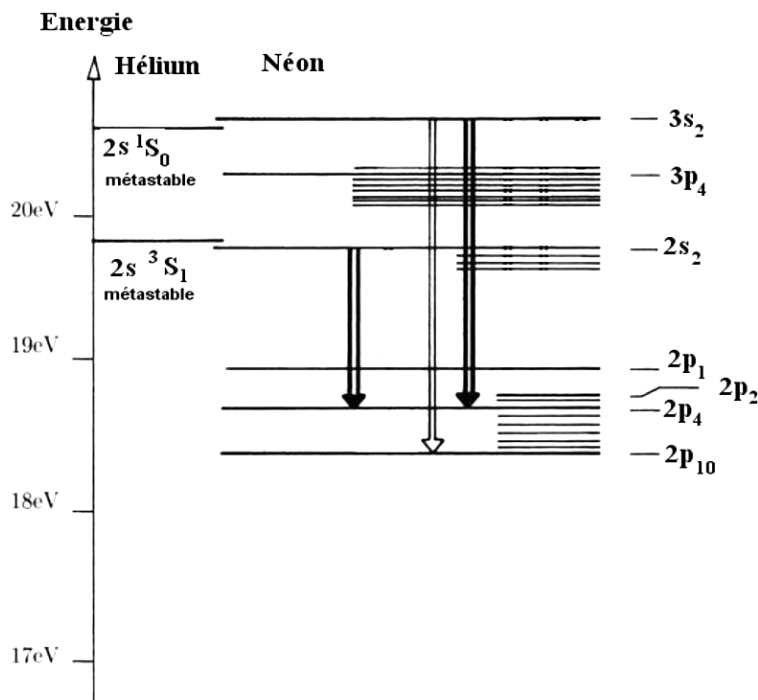


Figure 25

- ❶ La transition correspondant au passage des niveaux $3s^2 \rightarrow 2p^4$ à la transition émet la raie rouge à $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Retrouver la valeur de cette longueur d'onde à partir d'une exploitation de la figure 25. Il sera difficile de retrouver précisément cette valeur compte tenu de la précision des mesures que l'on peut avoir avec un double décimètre, mais un repérage soigné donnera une valeur proche de la valeur réelle de λ .
- ❷ Toujours en exploitant la figure 25, calculer les longueurs d'onde d'émission correspondant aux transitions $3s^2 \rightarrow 2p_{10}$ et $2s^2 \rightarrow 2p_4$. Laquelle correspond à l'émission de la raie verte ? Dans quel domaine d'émission se situe la troisième raie ?
- ❸ À partir des trois paragraphes précédents et du document suivant, effectuer un devoir de synthèse d'une quinzaine de lignes dans lequel vous expliquerez comment émettre un faisceau laser à partir d'un mélange gazeux d'ions He^+ et Ne^+ .

4. Propriétés du rayonnement laser

Les caractéristiques du rayonnement laser sont :

- L'onde émise est quasiment **monochromatique**.
- le faisceau émis est **très peu divergent** : quelques milliradians. Cette propriété est une conséquence des multiples réflexions ayant lieu dans la cavité laser. En conséquence, la puissance lumineuse concentrée dans le faisceau est très élevée. Par exemple, le faisceau d'un petit laser hélium néon d'une puissance d'émission de quelques milliwatts a une luminance, dans le rouge, mille fois supérieure à celle du soleil.

La luminance est l'intensité lumineuse d'une source lumineuse dans une direction donnée, divisée par l'aire apparente de cette source dans cette même direction.

Activité 12



Un faisceau laser a un rayon de 1 mm à la sortie d'un laser. Afin de mesurer la divergence du faisceau, on dirige le faisceau perpendiculairement à un mur distant de $D = 100$ m. On observe une tache lumineuse circulaire de rayon $R = 6$ cm.

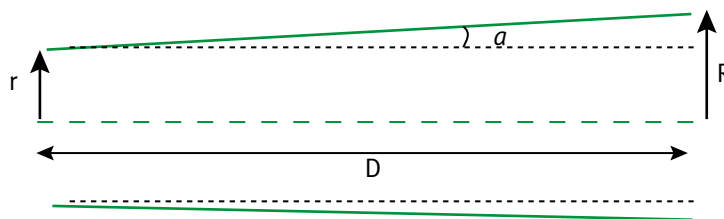


Figure 26

- 1 Exprimer $\tan \alpha$ en fonction de r , de R et de D (figure 26).
- 2 Pour les petits angles, quand ils sont exprimés en radians, on a : $\tan \alpha \approx \alpha$. Calculer α , angle de divergence du faisceau. Exprimer α en radians puis en degrés.

Activité 13



À partir du document vidéo disponible à l'adresse suivante, expliquer pourquoi les sabres laser utilisés dans les films *Star wars* sont irréalistes : <http://www.universcience.tv/media/3629/star-wars-et-le-sabre-laser.html>

5. Constituants d'un laser

Un laser comprend :

- un milieu actif ;
- une source lumineuse intense apportant l'énergie suffisante pour réaliser le pompage optique dans le milieu actif ;
- deux miroirs parallèles dont l'un est semi-transparent créant une cavité optique.

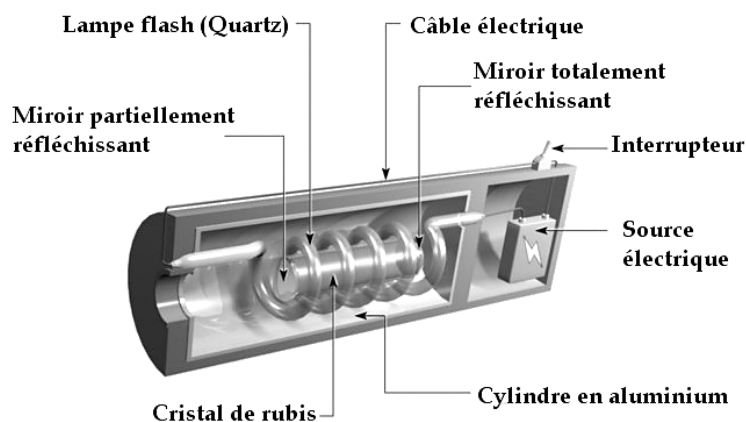


Figure 27: Laser à rubis (source documentaire)

Activité 14



❶ À partir de la figure 25, sur un laser à rubis, indiquer quels sont les éléments suivants :

- a) l'élément constituant le milieu actif ;
- b) l'élément constituant la source apportant l'énergie pour réaliser le pompage optique ;
- c) les éléments limitant la cavité résonante.

Le rubis est un élément qui utilise trois niveaux pour obtenir l'effet laser. En prenant pour origine le niveau E_1 , les niveaux 2 et 3 ont pour valeur : $E_2 = 1,71 \text{ eV}$, $E_3 = 2,26 \text{ eV}$.

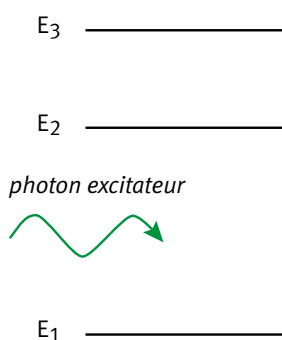


Figure 28

❷ Quel est le niveau métastable ?

Quelles sont la longueur d'onde de la radiation émise et sa couleur ?

❸ Ce laser émet par impulsions brèves, chaque impulsion a une puissance de 10 W et dure une nanoseconde. La fréquence f d'émission des impulsions est de 100 MHz. Quelle est la puissance moyenne d'émission du laser ?

Donnée $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$

6. Quelques lasers

Il est difficile de classer les différents types de lasers. Cette classification dépend du ou des critères choisis : nature du milieu amplificateur, puissance, utilisation...

a) Lasers solides

Les lasers solides utilisent comme milieu amplificateur des verres dopés (rubis, chrome, néodyme).

Ce sont des lasers puissants qui peuvent émettre dans le visible, l'ultraviolet, les rayons X.

Pour les plus puissants, ces lasers émettent par impulsion.

b) Lasers liquides

Le milieu actif est un liquide, colorant organique, dont on peut régler la longueur d'onde d'émission. La gamme d'émission s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge.

c) Laser à gaz

Le milieu actif est un gaz contenu dans un tube isolant. Les plus connus sont les lasers à argon, hélium-néon et CO_2 . Ces derniers émettent de fortes puissances dans l'infrarouge : $\lambda = 10 \mu m$.

7. Quelques applications des lasers

a) Applications théoriques

Les lasers ont toujours été, depuis leur début, des instruments de choix en recherche fondamentale. C'est une source de choix car elle est stable, quasi monochromatique et, au besoin, puissante. Elle a toujours été très utilisée dans les laboratoires de recherche et a permis de comprendre et d'expliquer des phénomènes physiques fondamentaux.

Actuellement, des lasers de grande puissance sont utilisés en physique nucléaire dans l'étude de la fusion atomique.

b) Applications médicales

Elles sont nombreuses. Le laser est utilisé en chirurgie, en particulier en chirurgie de l'œil. Citons aussi les applications en neurochirurgie, en odontologie, etc.

En recherche médicale, le laser est utilisé pour étudier l'interaction de la lumière avec les tissus biologiques.

c) Autres applications

Applications dans le domaine grand public, citons :

- Diodes laser utilisées dans la lecture des CD et DVD.
- Utilisation comme fil à plomb ou comme guide dans les travaux publics et le bâtiment.
- Lecteurs de codes-barre.
- Imprimantes laser.

Dans des domaines plus scientifiques, les lasers sont utilisés en météorologie pour analyser la pollution dans l'atmosphère, en télécommunications pour les transmissions dans les fibres optiques.

Nous ne pouvons citer toutes les applications qui existent maintenant et qui ne cessent d'augmenter.



Pour conclure

1. Résumé

L'interaction de la lumière avec la matière a depuis toujours intéressé les physiciens. C'était un des domaines de recherche fondamentale les plus étudiés à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle.

Les niveaux d'énergie des atomes sont quantifiés et les électrons qui gravitent autour du noyau peuvent **absorber** ou **émettre** des quanta d'énergie lumineuse.

La longueur d'onde λ d'un photon émis lors d'une transition du niveau i au niveau j est donnée par la relation de Planck : $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = E_i - E_j$

Un phénomène nouveau, évoqué par Einstein et mis en évidence expérimentalement, est **l'émission stimulée**, c'est-à-dire l'émission de lumière par les atomes déclenchée par un photon.

Cette émission stimulée permet, lorsqu'on a beaucoup d'électrons dans un état d'énergie excité, d'**amplifier** le faisceau incident.

Mais, en réalité, lorsqu'on considère un système, un gaz par exemple, à l'équilibre thermique, les atomes sont en grande majorité dans leur état fondamental. Plus le niveau d'énergie des états est élevé, moins il y a d'atomes dans ces états. Ainsi, si l'on éclaire ce gaz, il y aura plus de photons absorbés que de photons émis. Le faisceau sera donc atténué.

Il faudra donc, pour amplifier un faisceau lumineux, **inverser les populations**, c'est-à-dire densifier les niveaux d'énergie plus élevés au détriment du niveau fondamental qui, lui, devra être dépeuplé.

La maîtrise de ce processus d'inversion aura une conséquence importante : la réalisation des **amplificateurs de lumière**, les **lasers**.

Conditions pour obtenir l'effet laser

- a) Réaliser l'inversion de population par une méthode appelée pompage.
- b) Trouver les bons éléments. En effet, tous les atomes ne peuvent convenir. Il faut que les électrons restent un temps suffisant dans un niveau excité pour qu'il soit suffisamment peuplé et qu'un photon déclenche l'émission stimulée. Ces niveaux d'énergie particuliers sont des niveaux dits métastables, et tous les atomes n'en possèdent pas.
- c) Afin d'avoir une grande amplification, le faisceau doit passer et repasser dans le milieu amplificateur dans une **cavité** constituée de deux miroirs parallèles dont l'un n'est pas complètement réfléchissant. Pour que le faisceau ne se détruise pas par interférences dans la cavité, celle-ci doit être **résonante**, c'est-à-dire que sa longueur doit être un multiple de la demi-longueur d'onde de la lumière émise.

Les lasers sont très utilisés en recherche scientifique, médicale, et dans la vie courante.

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 4

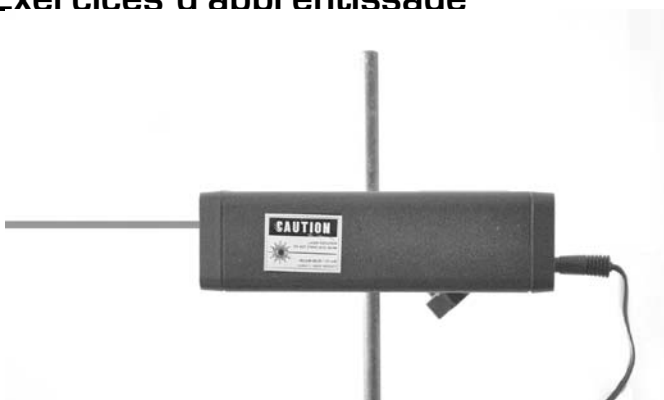
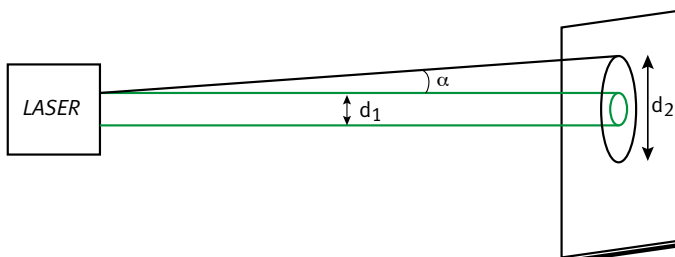


Figure 29 : Laser de laboratoire hélium-néon

Un petit laser de laboratoire émet un faisceau de lumière monochromatique, de longueur d'onde $632,8 \text{ nm}$, de diamètre $d_1 = 1 \text{ mm}$ à sa sortie avec une puissance $P = 95 \text{ mW}$. La divergence du faisceau est caractérisée par son demi-angle au sommet $\alpha = 0,1 \text{ degré}$.

- ❶ Quelles sont la fréquence d'émission de la radiation et la couleur du faisceau ?
- ❷ Calculer le diamètre d_2 de la tache située à 5 mètres du laser.



- ③ À la surface de la Terre, l'éclairement énergétique moyen du Soleil (puissance reçue sur unité de surface éclairée) est $E_S = 1,2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Comparer l'éclairement E du faisceau sur l'écran à E_S . Conclusion.

Exercice 5 Télémétrie laser

Lors de la mission Apollo 11, les cosmonautes ont déposé des miroirs en coin de cube qui ont la propriété de renvoyer une lumière incidente de la direction d'où elle vient. Placé au foyer d'un télescope sur Terre, un laser envoie une impulsion très brève, de longueur d'onde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ vers ces miroirs situés sur la Lune. L'impulsion d'énergie $0,5 \text{ J}$ est émise pendant 100 picosecondes . Une partie de l'énergie est reçue en écho $2,457 \text{ secondes}$ après l'émission.

- ① Calculer la puissance d'émission de cette impulsion.
- ② Calculer la distance Terre-Lune.
- ③ Quelle est l'énergie de chaque photon ? Combien de photons ont été émis pendant une impulsion ?
- ④ Le signal d'écho est très faible $E = 4,71 \text{ femto joules}$ ($1 \text{ femto joule} = 10^{-15} \text{ J}$). Combien de photons ont été reçus dans cet écho ?

Exercice 6 Un laser à gaz carbonique, utilisé comme laser de puissance, émet dans le domaine non visible. La longueur d'onde d'émission est $\lambda = 10,6 \text{ mm}$.

- ① Dans quel domaine de longueur d'onde se situe cette émission ?
- ② La puissance d'émission étant élevée, $P = 400 \text{ W}$, ce type de laser ne peut fonctionner que par impulsion. Chaque impulsion dure 1 ms et la fréquence d'émission $f = 200 \text{ Hz}$. Quelles sont la puissance et l'énergie d'une impulsion ?

4

Aspect ondulatoire de la lumière

A

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et corpusculaire.
- ▶ Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule.
- ▶ Connaître et exploiter la relation $p = h/\lambda$.
- ▶ Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
- ▶ Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.

B

Pour débiter le chapitre

Nous savons que pour se propager d'une source à notre oreille, le son a besoin d'un support matériel : l'air, l'eau ou un solide. La lumière solaire, pour atteindre notre planète, la Terre, traverse le vide. C'est donc une grande différence avec le son : elle n'a pas besoin de support pour se propager.

Activité 15



Une controverse scientifique

La science a souvent avancé par des échanges de points de vue contradictoires sur la nature de l'Univers qui nous entoure. Parmi ceux-ci s'est posée la question de savoir si de la lumière est un flux de particules (hypothèse corpusculaire) ou un paquet d'ondes (hypothèse ondulatoire).

À l'aide d'une recherche sur Internet ou dans une encyclopédie, associer une année au phénomène découvert, au physicien dans la liste suivante :

- Thomas Young, Albert Einstein, René Descartes, Isaac Newton ;
- Dispersion, réfraction, effet photo-électrique, interférences ;
- 1678, 1637, 1905, 1801.

Classer ces associations en deux ensembles suivant qu'elles contribuent à une hypothèse corpusculaire ou ondulatoire de la lumière.

Reprenant la théorie d'Huygens, Augustin Fresnel expliqua le résultat de l'expérience de Young par le comportement ondulatoire de la lumière, sans préciser la nature des ondes lumineuses.

De nombreuses autres expériences d'interférences et de diffraction vinrent confirmer le caractère ondulatoire de la lumière.

b) Diffraction de la lumière

Lorsqu'on envoie un faisceau laser sur une fente très fine, ou sur un fil très fin (cheveu), on observe, sur un écran placé derrière cet objet, une figure de diffraction caractéristique du comportement ondulatoire de la lumière.

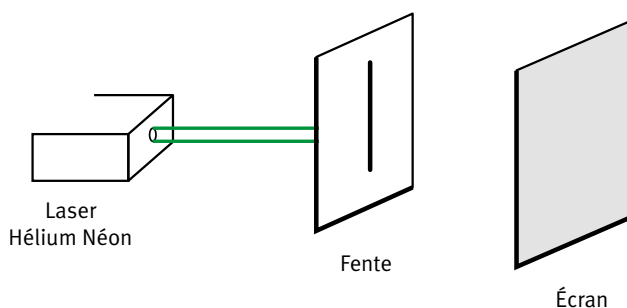


Figure 32 : Schéma de l'expérience de diffraction

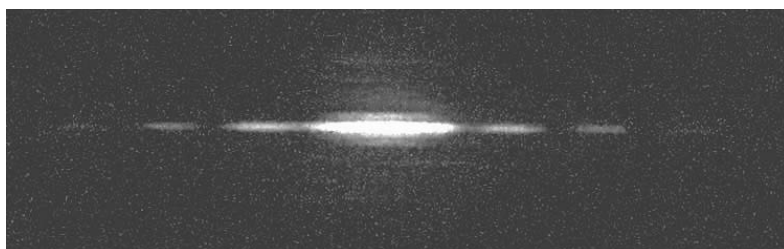


Figure 33 : Figure de diffraction

2. Aspect particulaire de la lumière

La nature de la lumière, qui est une onde électromagnétique, fut comprise et expliquée principalement par les travaux de Hertz et Maxwell. Le modèle ondulatoire de la lumière était pleinement accepté par la communauté scientifique... jusqu'à ce que Einstein, au début du xx^e siècle énonçât que la lumière devrait aussi présenter un aspect corpusculaire.

a) Découverte de l'effet photoélectrique

Une expérience, l'effet photoélectrique, vint jeter le trouble. L'effet photoélectrique est la propriété qu'ont certains métaux d'émettre des électrons lorsqu'ils

sont éclairés. On avait constaté que l'émission électronique par un métal illuminé n'existait que si la longueur d'onde était suffisamment courte ($\lambda < \lambda_0$). Au-delà de cette valeur seuil λ_0 , l'effet ne se produit plus, ceci **quelle que soit l'intensité de l'éclairement**.

En 1905, Einstein expliqua l'effet photoélectrique, ce qui lui valut d'obtenir le prix Nobel de physique en 1921. Essayons d'expliquer comment l'effet photoélectrique remet en cause l'aspect ondulatoire de la lumière.

Dans un métal, il y a des électrons libres, c'est-à-dire des électrons qui peuvent se déplacer librement dans le métal, sans pouvoir en sortir, à moins d'un apport d'énergie. Cette énergie peut être fournie par la chaleur en chauffant le métal ou par apport d'énergie lumineuse en éclairant le métal. Cette énergie pour faire sortir un électron du métal est appelée énergie d'extraction E_S .

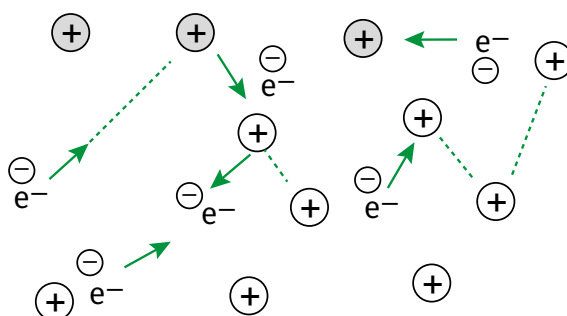


Figure 34 : Électrons libres dans un métal

Activité 16



- ❶ Rappeler l'expression de l'énergie d'un photon de longueur d'onde λ .
- ❷ On considère trois photons de longueurs d'onde $\lambda_1 = 350 \text{ nm}$; $\lambda_2 = 0,9 \mu\text{m}$ et $\lambda_3 = 500 \text{ nm}$. Dans quels domaines des ondes électromagnétiques se situe chacun de ces photons : visible, ultraviolet, infrarouge ?
- ❸ Calculer leurs énergies en électron-volts. Quel est le photon le plus énergétique ?

Donnée

- Constante de Planck : $h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

b) Expérience sur l'effet photoélectrique

Éclairons une plaque métallique chargée placée sur un électroscope avec un faisceau lumineux de longueur d'onde $\lambda > \lambda_0$. L'électroscope permet de constater s'il y a, ou non, une fuite de charges. En effet, les feuilles de l'électroscope sont écartées ; elles se repoussent car elles sont chargées d'électricité de même signe (apportées par la plaque métallique). S'il y a fuite de charges du conducteur unique constitué par la plaque métallique et l'électroscope, les feuilles de ce dernier, ne se repoussant plus, retombent.

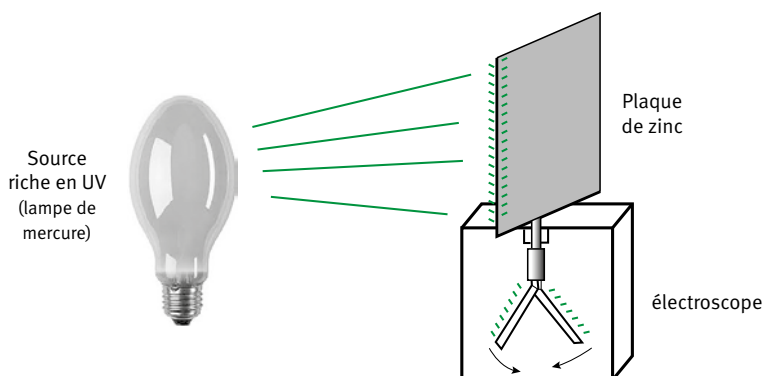


Figure 35 : *Expérience sur l'effet photoélectrique*

On pourrait penser qu'en augmentant l'intensité de l'onde, c'est-à-dire en augmentant l'apport d'énergie sous forme d'énergie lumineuse, on pourrait transférer, à partir d'une certaine intensité, l'énergie d'extraction suffisante pour « arracher » un électron libre du métal. Il n'en est rien : on constate que les feuilles de l'électroscope restent écartées, ce qui prouve qu'aucune charge n'est partie. Par contre, si le faisceau est de courte longueur d'onde $\lambda < \lambda_0$ (ultraviolet), les feuilles de l'électroscope retombent, ce qui prouve que des électrons ont quitté le conducteur. De plus, cette émission a lieu même avec un faisceau de très faible intensité.

Conclusion

L'énergie transmise de la lumière aux atomes dépend seulement de la fréquence (ou de la longueur d'onde) et pas de l'intensité du faisceau lumineux.

Pour expliquer ce phénomène Einstein a émis l'hypothèse suivante : l'énergie lumineuse est transportée par des photons, chaque photon est un quantum d'énergie. Si ν est la fréquence de la radiation lumineuse, la quantité d'énergie du photon est :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ où } h \text{ est la constante de Planck } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$

Un faisceau lumineux est constitué de grains (ou photons) d'énergie $E = h\nu$. Quand un photon rencontre un électron, il lui transmet son énergie et, si cette énergie $E = h\nu$ est supérieure à l'énergie E_s de seuil, cet électron est extrait du métal.

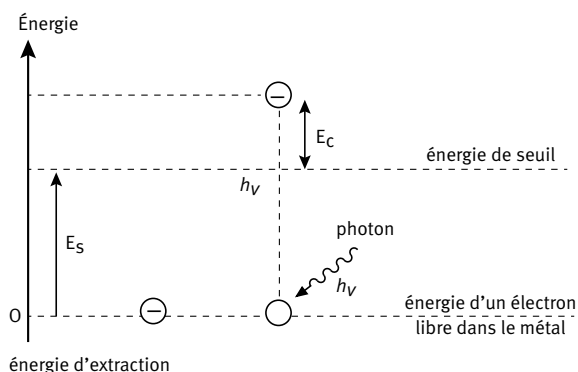


Figure 36 : *Énergie d'extraction*

Lorsqu'il est supérieur à E , le surplus d'énergie transmis par le photon est évacuée par l'électron sous forme d'énergie cinétique E_c .

c) La lumière est-elle une onde ou constituée de photons ?

La lumière montre un comportement ondulatoire puisque l'on peut observer des phénomènes de diffraction et d'interférences. Mais, avec l'effet photoélectrique, elle montre un comportement corpusculaire. La question que l'on peut se poser légitimement : la lumière est-elle une onde ou constituée de photons ?

Elle est l'un et l'autre et, selon le phénomène où elle intervient, c'est son aspect corpusculaire ou ondulatoire qui se manifeste. Cependant, disons que l'aspect ondulatoire est celui avec lequel nous sommes le plus habitués. La raison pour laquelle les photons ne font pas partie de notre quotidien est que le nombre de photons dans un faisceau lumineux est énorme, et nous n'en voyons que les effets collectifs, pas individuels.

On peut faire l'analogie avec un courant d'eau sortant d'un robinet, l'eau jouant le rôle de la lumière. En réduisant le débit au robinet, le diamètre du filet d'eau se réduit. Mais, en diminuant encore ce débit, le filet d'eau se réduit. De même, l'intensité lumineuse émise par une lampe se réduit quand on diminue le courant qui la traverse. Si nous fermons davantage le robinet, nous commençons à voir tomber des gouttes. Il sort de l'orifice du robinet des « quanta » d'eau indivisibles.

De même, en dessous d'une certaine intensité lumineuse, une source émet des quanta de lumière un par un : plus on réduit l'intensité, plus le nombre de quanta est faible, mais chaque quantum garde la même énergie $E = h\nu$.

d) Expériences d'interférences lumineuses à très faible intensité

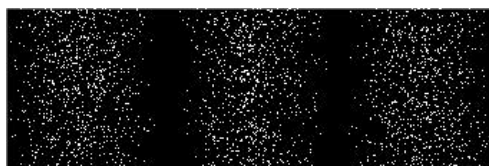
On éclaire un système de fentes de Young avec un faisceau lumineux de très faible intensité. L'intensité est si faible que l'on peut considérer que les photons arrivent un par un sur le détecteur (une plaque photographique).

Activité expérimentale

Avec des poses courtes, la répartition des impacts semble aléatoire mais, si la durée de l'expérience est suffisante, on observe sur le détecteur que les impacts forment des franges analogues à la figure d'interférence classique.



250 photons



1000 photons

Faire la recherche suivante à l'aide d'un moteur de recherche : **Univ Le Mans physique divers**.

Sur la page affichée, choisir **mécanique quantique**. On se trouve alors sur la page <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/divers/interphot.html>

Observer la figure d'interférences pour les quatre simulations proposées, le détecteur recevant 250, 500, 1000 et 5 000 photons. Plus le nombre de photons envoyé est grand, plus on se rapproche d'une figure d'interférence en faisceau d'intensité classique.

On pourra, sur le site suivant, choisir le nombre de photons et voir les figures d'interférences obtenues.

Le site suivant obtenu sur le même moteur de recherche : **cortial.net** puis **animations interactives**, puis **interférences à deux ondes** et enfin **photons**, permet de faire varier le nombre de photons. Il suffit de « cliquer » une fois pour lancer l'animation, cliquer à nouveau une fois pour arrêter, puis encore un clic pour continuer, etc. Si l'on recommence, un double clic permet d'effacer l'écran précédent... et de recommencer.

http://web.cortial.net/bibliohtml/sttyng_j.html

3. Particules et ondes de matière

a) L'hypothèse de Louis de Broglie

L'effet photoélectrique, la théorie de Planck, l'émission (ou l'absorption) discontinue de lumière par les atomes, les travaux d'Einstein, avec sa célèbre formule signifiant que la masse avait une énergie, amenèrent le Français Louis de Broglie à émettre une hypothèse hardie.

Sa réflexion portait sur l'énergie, une grandeur quantifiée chez Planck, dotée de masse chez Einstein.

Ainsi, par le rapprochement des deux expressions $E = h\nu$ (Planck) et $E = mc^2$ (Einstein), il lui apparut possible d'associer une notion corpusculaire, la masse m , à une grandeur ondulatoire, la fréquence ν , d'où $mc^2 = h\nu$, soit encore $mc = h \frac{\nu}{c}$.

Avec $\frac{c}{\nu}$, où c est la vitesse de la lumière, on obtient : $mc = \frac{h}{\lambda}$.

Remarque mc est homogène à une quantité de mouvement ($p = mc$).

Mais une telle équivalence s'appliquerait-elle à un corps matériel, un caillou ou un électron ?

En 1923, Louis de Broglie énonça qu'à toute particule matérielle en mouvement à la vitesse v est associée une onde dont la longueur d'onde λ est donnée par la formule $p = mv = \frac{h}{\lambda}$. On retrouve la longueur d'onde de l'onde associée à la

particule de masse m animée de la vitesse v donnée par la célèbre formule dite formule de de Broglie où c , vitesse de la lumière, est remplacée par v , vitesse de la particule de masse m . Soit $\lambda = \frac{h}{p}$.

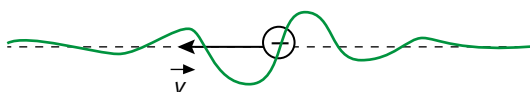


Figure 37 : Onde associée à un électron

Rappelons quelques ordres de grandeur pour lesquels nous avons observé des interférences ou de la diffraction :

Expérience	Ordre de grandeur de λ	Largeur de l'obstacle
Vagues sur une cuve à ondes	Centimètre	De plusieurs centimètres au millimètre
Acoustique	Du mètre à 5 cm	Inférieur au mètre (largeur d'une porte)
Optique	0,4 à 0,8 μm	Entre 100 et quelques micromètres

On observe expérimentalement ces phénomènes si l'obstacle diffractant a une dimension du même ordre de grandeur que la longueur d'onde λ . Ces phénomènes sont encore observables si l'ouverture ne dépasse pas quelques dizaines de fois λ . Au-dessus de cette limite, il n'y a plus d'interférences ni de diffraction.

Activité 17



① Calculer la longueur associée aux objets suivants :

Objet	Masse	Vitesse	λ
Obus	1 kg	600 km/h	
Balle de tennis	58 g	200 km/h	
Électron	$9 \cdot 10^{-31}$ kg	50 000 km/s	

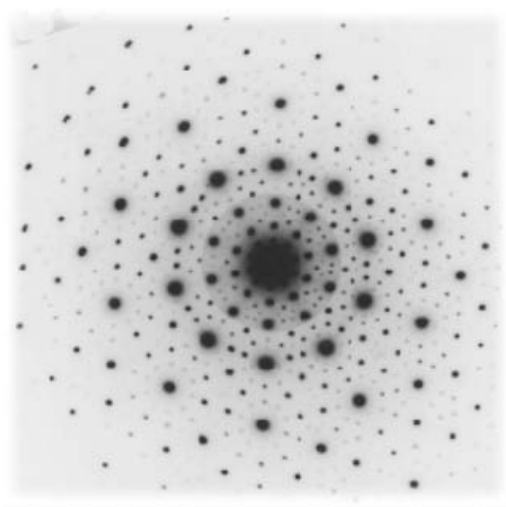
② Compte tenu des valeurs des longueurs d'onde associées, le caractère ondulatoire peut-il se manifester dans une expérience de diffraction ou d'interférences ?

Cette théorie des ondes de matière désarçonna le monde scientifique par son audace révolutionnaire.

Les conséquences étaient immenses. En effet, puisqu'une onde est associée à un électron, on doit pouvoir observer des interférences ou un phénomène de diffraction. C'est l'expérience que réalisèrent, en 1927, les physiciens américains Davisson et Germer.

b) L'expérience de Davisson et Germer

Lorsqu'on envoie un faisceau de rayons X sur un cristal (solide dont les atomes sont répartis régulièrement suivant des symétries bien précises), on observe des figures de diffraction.



R. Côté, Cours « Mécanique quantique ».

Figure 38 : *Diffraction obtenue par un faisceau de rayons X sur un cristal*

L'analyse d'une figure de diffraction telle que celle ci-dessus permet de connaître la structure à l'échelle microscopique du cristal étudié.

Le choix des rayons X pour cette expérience est lié à la longueur d'onde de cette radiation λ . λ est égal à quelques dixièmes de nanomètres, ce qui correspond aux dimensions entre atomes ou ions dans le cristal. Comme pour la diffraction par une fente en lumière visible, les phénomènes de diffraction sont bien visibles lorsque la fente ou le fil qui crée la diffraction a des dimensions voisines de la longueur d'onde de la lumière.

Activité 18



- 1 Calculer l'énergie en eV d'un photon X de longueur d'onde 0,1 nm.
- 2 Calculer la longueur d'onde associée à un électron de masse m animé d'une vitesse de 1500 km/s.

On constate que les longueurs d'onde calculées sont du même ordre de grandeur.

Davisson et Germer ont eu l'idée d'envoyer un faisceau d'électrons sur un cristal de nickel placé dans le vide. Ils ont obtenu une figure de diffraction identique à celle qu'auraient donnée des rayons X de même longueur d'onde. La preuve de l'hypothèse de Louis de Broglie était expérimentalement démontrée. Louis de Broglie reçut pour cette découverte le prix Nobel de physique en 1933.

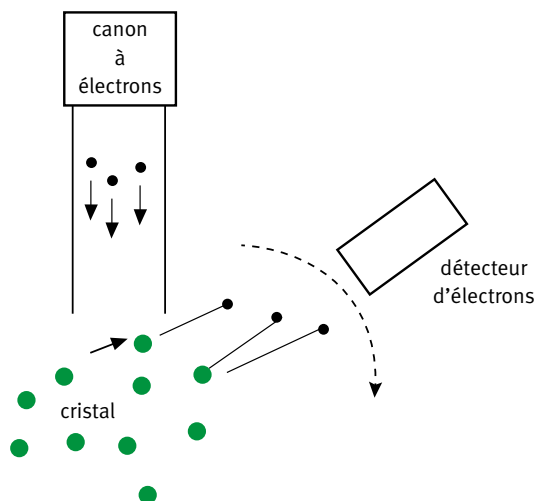


Figure 39 : Dispositif expérimental de l'expérience de Davisson et Germer

c) Interférences obtenues avec des électrons

On a observé des figures d'interférences en envoyant des électrons sur deux fentes, comme le montre le montage simplifié ci-dessous. La réalisation pratique est, par contre, plus délicate que l'expérience des fentes de Young avec une onde lumineuse. En effet, les longueurs d'onde associées aux électrons sont au maximum de l'ordre du nanomètre. Il faut donc que la distance entre les deux fentes ne soit pas supérieure à quelques nanomètres.

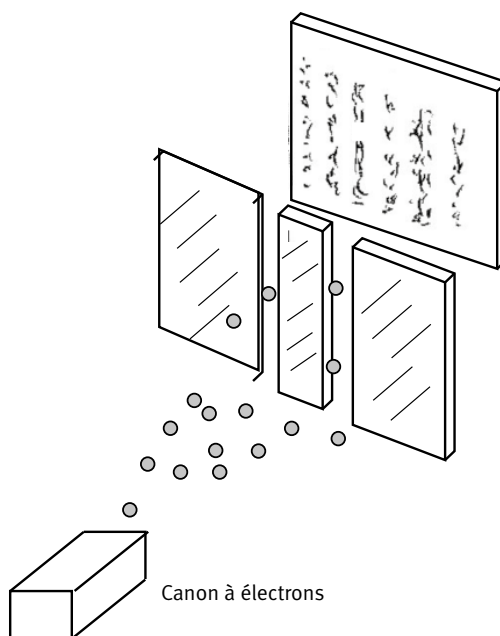


Figure 40 : Interférences obtenues avec des électrons

4. Applications des ondes de matière

a) Le microscope électronique

Dans un microscope électronique, un faisceau d'électrons remplace le faisceau lumineux du microscope classique.

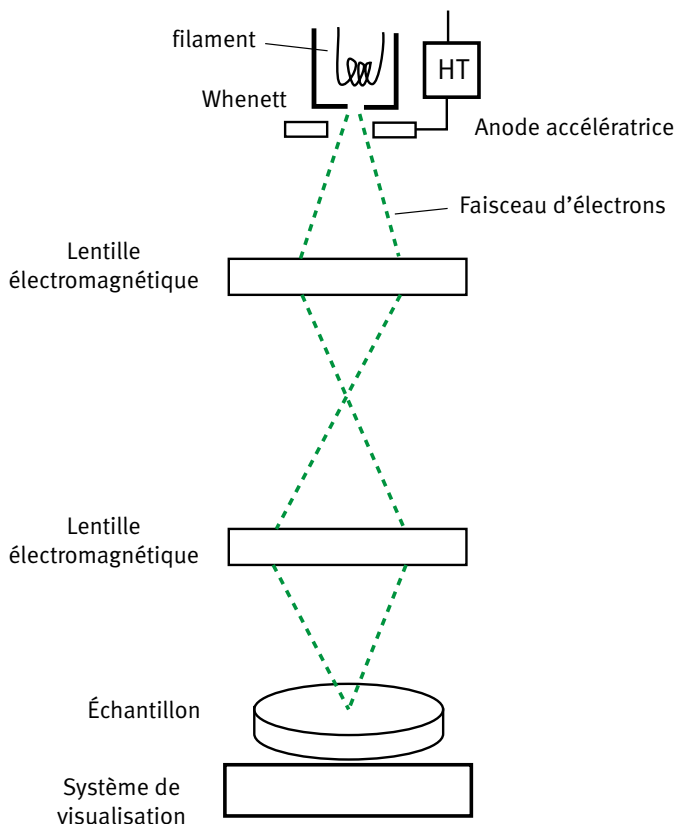


Figure 42 : Schéma microscope électronique

Un canon à électrons émet un faisceau d'électrons émis par effet thermoélectronique à partir d'un filament de tungstène chauffé à 2 500 °C. Ces électrons sont accélérés à partir du Whenelt par une haute tension réglable de 10 à 150 kV. Des lentilles électroniques agissent sur les électrons pour les dévier dans leur course grâce à des champs magnétiques créés par de puissants bobinages et les faire converger sur l'échantillon à observer.

Activité 19

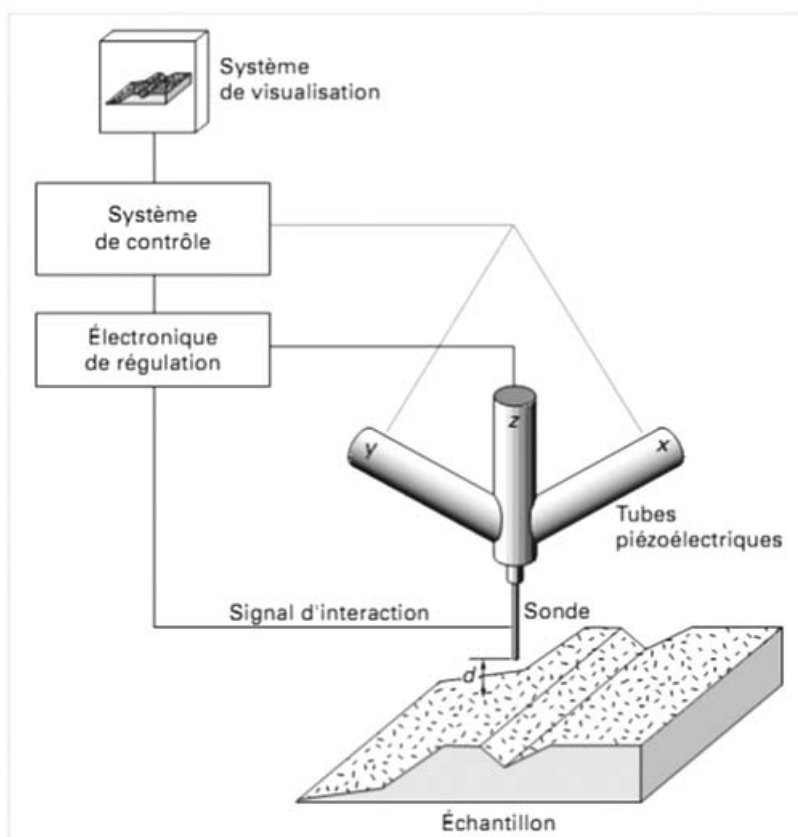


- 1 Calculer l'énergie acquise par un électron après avoir été accélérée depuis une vitesse nulle par une tension $U = 10 \text{ kV}$.
- 2 Quelle est la vitesse acquise par cet électron sachant que toute cette énergie se retrouve sous forme d'énergie cinétique ?
- 3 En déduire la longueur d'onde associée par cet électron.

- 4 En admettant que la résolution de cet appareil, c'est-à-dire l'aptitude à séparer des détails voisins, ne pourra pas être inférieure à la longueur de l'onde associée aux électrons, calculer cette résolution minimale.

b) Le microscope à effet tunnel

Une aiguille, qui joue le rôle de sonde, est maintenue à une distance d constante d'un échantillon par des tubes piézoélectriques. La **piézoélectricité** est la propriété que possèdent certains corps de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Elle permet de contrôler les déplacements de la sonde inférieure au nanomètre.



Éric Balnois, Université de Bretagne occidentale.

Figure 43 : Principe du microscope à effet tunnel

Ce microscope est une application de la dualité onde-corpuscule. Considérons un électron libre dans un échantillon métallique. Il ne peut sortir du métal car son énergie mécanique est inférieure à l'énergie de seuil qui lui permettrait de quitter le métal. Pour rejoindre la sonde située à une distance d , l'électron est bloqué par une « barrière de potentiel » qu'il ne peut franchir.

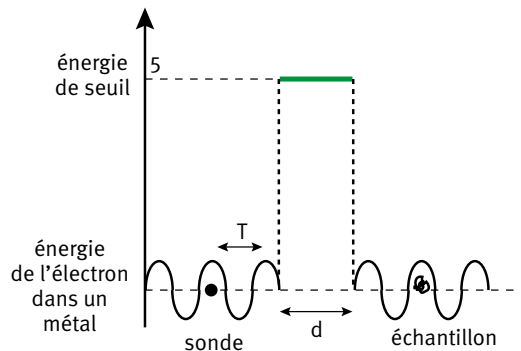
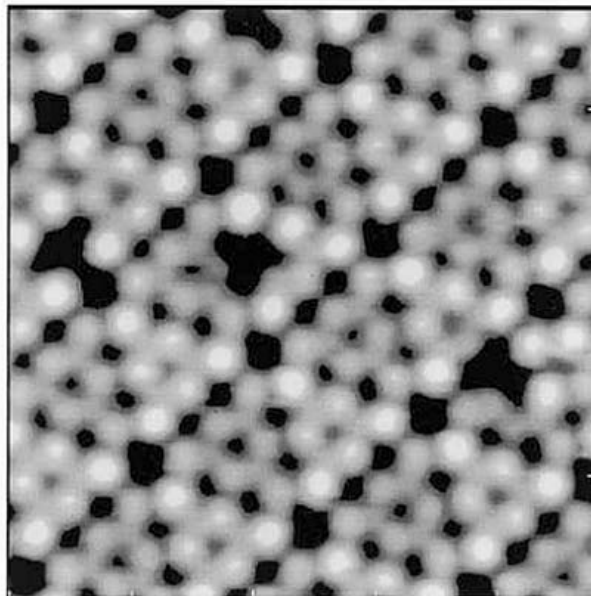


Figure 44 : Barrière de potentiel

Cependant, si l'onde associée à la particule est comparable à la distance d entre l'échantillon et la pointe de la sonde, la mécanique quantique prévoit que la particule peut traverser par effet tunnel cette barrière de potentiel. En mécanique classique, l'électron ne peut aller de l'échantillon à la sonde qu'en acquérant une énergie suffisante pour passer au-dessus de la « barrière de potentiel ». La mécanique quantique autorise à traverser la barrière de potentiel comme s'il existait un tunnel, d'où le nom d'effet tunnel.

Pour une distance d , on mesure un courant caractéristique $I = f(d)$ passant de l'échantillon à la sonde. Si l'on déplace à courant constant, la sonde suivra la surface de l'échantillon à une distance d constante. On aura à l'échelle atomique une cartographie de la surface.



Franck SALVAN, Franck TMIBAUDAU GPEC, Faculté des Sciences de Luminy Université de la Méditerranée.

Figure 45 : Atomes à la surface d'un échantillon observés par microscopie par effet tunnel

Activité expérimentale

À l'aide d'un moteur de recherche, aller sur le même site de l'université du Mans **Univ Le Mans physique divers**.

Sur la page affichée, choisir **mécanique quantique**, puis la rubrique **barrière de potentiel**.

Sur l'animation est visualisée une onde qui peut être l'onde associée à un électron. La mécanique quantique décrit le comportement des particules à l'échelle atomique à partir de leur onde associée. Nous verrons plus loin que plus l'**amplitude** en un point de l'onde associée est **grande**, plus la probabilité de trouver la particule dans une petite région entourant ce point sera importante.

Laisser les calculs « compliqués » hors programme pour vous, et aller directement en bas de page pour lire les paramètres que vous pouvez modifier avant de lancer la simulation.

- 1 Fixer la largeur de la barrière à $a = 1$ et l'énergie des particules incidentes à $E = 3$.

Vous observez une valeur $T = 28\%$, ce qui signifie que 28% des particules incidentes traversent la barrière de potentiel. L'amplitude de l'onde associée après traversée de la barrière de potentiel plus faible traduit ce pourcentage.

- 2 Faire varier seulement la largeur de la barrière de potentiel. Comparer l'amplitude de l'onde associée après traversée et le taux de T de traversée. Quelles conclusions pouvez-vous tirer ?
- 3 Fixer la largeur de la barrière de potentiel à $a = 1$, puis faire varier l'énergie des particules incidentes en dessous de l'énergie de la barrière fixée à 5 (unité arbitraire). Qu'en concluez-vous sur le taux de traversée et l'amplitude de l'onde associée ?

5. Aspect probabiliste de l'expérience des fentes de Young

Revenons sur l'expérience des fentes de Young en très faible flux lumineux, c'est-à-dire éclairées photon par photon (où la même expérience lorsqu'on bombarde deux fentes avec des électrons).



Figure 46 : Chaque particule est détectée par son impact très précis sur le détecteur. On constate cependant un éparpillement des impacts, ce qui signifie qu'on ne peut prédire où va arriver exactement notre particule ou notre photon sur la plaque de détection.

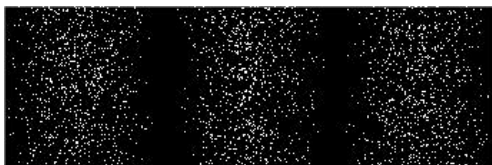


Figure 47 : Si l'on continue d'enregistrer les impacts des photons ou particules que l'on envoie, on constate qu'une figure apparaît (ressemblant à une figure d'interférences) avec des zones claires où de nombreux impacts ont lieu et des zones sombres où il y a très peu d'impacts.

En termes statistiques, on peut dire que la probabilité d'un impact est très grande dans une zone claire et extrêmement faible dans une zone sombre.

Cette expérience des franges de Young présente à la fois un caractère ondulatoire et probabiliste. La particule est une onde puisque l'on observe des franges d'interférences et une particule par son impact quand on la détecte.

L'onde traduit un comportement statistique des particules. Pour un photon (ou un électron) particulier, on ne sait pas par quelle fente il passe, ni où il arrivera exactement. On sait seulement avec quelle probabilité dans une région choisie du détecteur.

La mécanique quantique a permis de décrire l'onde comme une fonction $\Psi(x, y, z, t)$ caractérisant l'état de la particule à l'instant t . On admettra, dans une théorie que nous ne pouvons développer ici, que $\|\Psi(x, y, z, t)\|^2 d\tau$ est la probabilité de trouver la particule à l'instant t dans un volume $d\tau$ entourant le point M de coordonnées (x, y, z) .

Ainsi, dans la figure de diffraction obtenue par un faisceau de rayons X sur un cristal, la probabilité de trouver l'électron sur une tache sombre est plus importante qu'en un autre point.

En mécanique classique, la deuxième loi de Newton $m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}$ décrit le mouvement et donne la trajectoire de la particule.

En mécanique quantique, il n'est plus question de trajectoire puisqu'il s'agit d'une onde. L'équation de Schrödinger remplace la deuxième loi de Newton pour décrire le comportement de cette onde.

6. L'équation de Schrödinger $H\Psi = E\Psi$

En mécanique quantique, le comportement de l'électron s'étudie à partir de son onde associée, qui est une fonction $\Psi(x, y, z, t)$ caractérisant l'état de la particule à l'instant t . La grandeur $\|\Psi(x, y, z, t)\|^2 d\tau$ est la probabilité de trouver la particule à l'instant t dans un volume $d\tau$ entourant le point M de coordonnées (x, y, z) .

L'équation de Schrödinger remplace la deuxième loi de Newton pour décrire le comportement de cette onde. Elle se formule de la manière suivante :

$$H\Psi = E\Psi \quad (\text{l'étude de cette équation est hors programme})$$

H est une fonction complexe qui prend en considération les interactions de l'électron avec les autres particules qui l'environnent. Appliquée à l'électron unique de l'atome d'hydrogène, l'équation de Schrödinger permet de connaître la fonction d'onde Ψ pour chaque niveau d'énergie de l'électron. Cette équation montre également que la répartition des niveaux d'énergie de l'électron dans l'atome

d'hydrogène est bien discontinue, comme l'ont prouvé expérimentalement les spectres d'émission de cet atome.

En mécanique quantique, il n'est plus question de trajectoire puisqu'il s'agit d'une onde. L'équation de Schrödinger remplace la deuxième loi de Newton pour décrire le comportement de cette onde.

La mécanique quantique ou ondulatoire a permis de donner une image plus réaliste du comportement des électrons autour du noyau d'un atome.

On représente par des niveaux de gris les régions où la densité de probabilité est plus ou moins grande.

À l'intérieur de cette orbitale, la probabilité de présence de l'électron varie en fonction de la distance r au noyau.

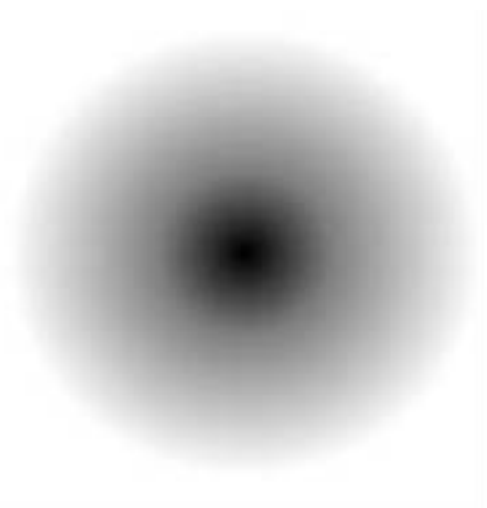


Figure 48 : Nuage électronique de l'atome d'hydrogène



Pour conclure

1. Résumé

La **lumière** présente un **double comportement** :

- Comportement **ondulatoire** qui se manifeste par des phénomènes d'**interférences** et de **diffraction**.
- Comportement **corpusculaire**, qui se manifeste par l'**effet photoélectrique**.

Les **particules de matière** comme l'électron présentent également un **double comportement** :

- **Corpusculaire**, obéissant aux lois de la mécanique énoncées par Newton.
- **Ondulatoire**, suggéré par Louis de Broglie (1923) et vérifié expérimentalement par Davisson et Germer (1927).



En conséquence, **un électron possède une onde associée** de longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{mv}$, typiquement de l'ordre du nanomètre et en dessous.

Importance des ondes de matière

Le comportement ondulatoire a permis de repousser les limites d'observation de la matière à l'échelle atomique.

Les ondes lumineuses permettent d'observer des détails supérieurs à 400 nm. Les ondes de matière permettent d'observer des détails de l'ordre du dixième de nanomètre.

D'autres microscopes, comme le microscope à effet tunnel, permettent de descendre à ces limites de résolution.

Importance théorique des ondes de matière

Elles montrent que la mécanique classique doit être abandonnée à l'échelle atomique. Une **particule** n'a plus un comportement **déterministe** (les mêmes causes créent les mêmes effets) mais un comportement **probabiliste**.

La mécanique quantique doit remplacer la mécanique classique et étudier le comportement de la matière à partir de son onde associée.

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 7 Réacteur à neutrons

Dans un réacteur à neutrons, comme celui de l'Institut Laue-Langevin, à Grenoble, on peut produire de puissants flux de neutrons à trois températures différentes :

Type de neutrons	Température (K)	Vitesse (m.s ⁻¹)	P = mv
Neutrons chauds	2 000	7 000	
Neutrons froids	25	786	
Neutrons thermiques	300	2720	

**Données
numériques**

- Masse du neutron, $m = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg.
- Constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

- 1 Calculer les quantités de mouvement de chaque type de neutrons, puis leur longueur d'onde de de Broglie associée.
- 2 On préfère, comme dans l'expérience de Davisson et Germer, « bombarder » des cristaux avec des neutrons plutôt qu'avec des protons, bien que ces derniers aient sensiblement la même masse que le proton. Les protons sont pourtant très faciles à produire : il suffit d'ioniser un atome d'hydrogène. Il y a donc une raison de choisir des neutrons, laquelle ?

- ③ On désire réaliser une diffraction de neutrons sur un cristal dont les distances interatomiques sont autour de 0,4 nm. On sait que la diffraction d'une onde par le cristal est optimale lorsque la longueur d'onde est le plus proche possible de cette valeur. Quel type de neutrons choisiriez-vous : chauds, froids ou thermiques ?



Figure 49 : Réacteur à neutrons, Institut Laue-Langevin de Grenoble
http://fr.wikipedia.org/wiki/Institut_Laue-Langevin

Exercice 8 Effet photoélectrique

On éclaire un métal avec un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ .

Un photon d'énergie $E = h\nu$ est absorbé par un électron lui communiquant l'énergie suffisante pour s'extraire du métal. Cette énergie est supérieure à l'énergie E_S d'extraction du métal.

- ① Sachant que l'énergie de l'électron extrait se retrouve sous forme d'énergie cinétique E_C , donner la relation liant E , E_C et E_S . En déduire la relation reliant la vitesse v_0 , la fréquence ν de la radiation lumineuse et l'énergie de seuil E_S .
- ② On réalise l'expérience suivante : la surface plane du conducteur éclairée par le faisceau de lumière de la question précédente constitue l'une des armatures d'un condensateur plan. Elle est maintenue au potentiel zéro volt. L'autre armature est portée par un générateur de tension, au potentiel U que l'on peut faire varier entre $+U_{\max}$ et $-U_{\max}$.

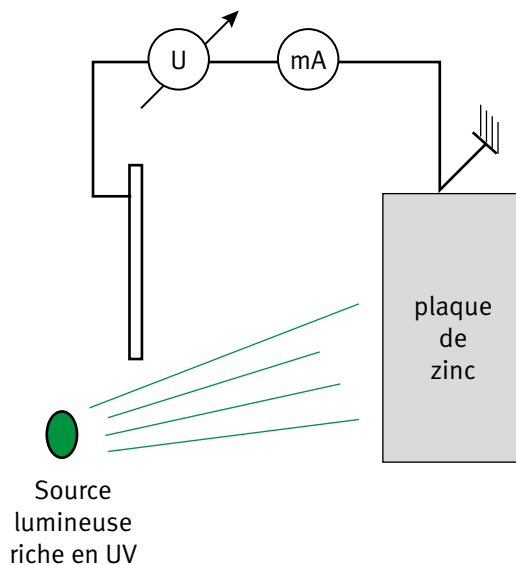


Figure 50 : *Expérience sur l'effet photoélectrique*

Lorsque U est positif, indiquer, après avoir reproduit le schéma, le sens du champ électrique $\vec{E}$.

L'électron quitte le métal avec une vitesse v_0 . Avec $U > 0$, l'électron sera-t-il accéléré ou ralenti ?

- ③ On choisit le signe de U tel que l'électron soit ralenti. On augmente alors $|U|$ jusqu'à ce que le courant détecté par le milliampèremètre devienne nul. Soit $U_1 = |U|$ à cette valeur qui rend le courant nul.

Que peut-on dire de la vitesse de l'électron juste avant que $|U|$ atteigne la valeur U_1 ?

Expliquer qualitativement le mouvement de l'électron lorsque $|U|$ devient légèrement supérieur à U_1 . L'électron atteint-il la plaque ? Que peut-on dire de la vitesse de l'électron lorsque $|U| = U_1$? Comment varie le courant électrique autour de la valeur U_1 ?

- ④ On se place dans la situation où $|U| = U_1$. Quelle est l'énergie mécanique de l'électron quittant le métal avec la vitesse v_0 ?

Quelle est l'énergie mécanique de l'électron à son arrivée sur l'autre plaque du condensateur ?

En appliquant la loi de conservation de l'énergie mécanique, en déduire l'énergie cinétique de l'électron à la sortie du métal. On fera l'hypothèse que les éventuels chocs d'un électron sont élastiques, c'est-à-dire sans perte d'énergie.

Donnée Énergie potentielle d'une particule de charge q dans un champ électrostatique en un point de potentiel U : $E_p = q.U$.

On suppose l'énergie potentielle de pesanteur négligeable.

- 5 On éclaire successivement le métal avec diverses sources lumineuses et l'on mesure, dans chaque cas, le potentiel d'arrêt U_1 . On obtient le tableau suivant :

$U_1(V)$	0,76	0,96	1,17	1,37	1,58
$\nu(Hz)$	$5 \cdot 10^{14}$	$5,5 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$	$6,5 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$
$\lambda(nm)$					

Compléter ce tableau.

Reporter sur un graphe ces points avec U_1 en ordonnée et ν en abscisse. Constaté que l'on peut obtenir une loi affine : $U_1 = a\nu + b$.

À partir des questions précédentes, exprimer a et b en fonction de h , de ν et de E_S .

À partir du tableau de mesures, calculer a et b . Cette expérience a été réalisée en 1916 par Millikan. Montrer que l'on peut calculer h , constante de Planck, à partir de la pente de la droite donnée par le graphique. Calculer également à partir de ce tableau de mesure l'énergie de seuil E_S , énergie que l'on exprimera en électron-volts.

5

Pour clore la séquence

A

Fiche de synthèse

Galilée (1564-1642) a été le véritable initiateur de l'esprit scientifique moderne. Avec lui, on ne pouvait espérer comprendre le monde qui nous entoure sans les mathématiques comme outil et la méthode expérimentale comme moyen d'investigation. Les progrès de la science ont amené les physiciens à voir ce qui était hors de portée de leurs sens, c'est-à-dire l'infiniment petit. Louis Pasteur, pour ne citer que lui, a exploré l'infiniment petit. Dans ce nouveau continent, il a découvert ses habitants, les microbes.

Le monde microscopique, hors de portée de nos sens, est un monde totalement différent de celui dans lequel nous vivons. Le moindre objet à peine visible, un grain de sable, une goutte d'eau, contient un nombre d'atomes ou de molécules gigantesque, dépassant tous les nombres que nous sommes habitués à utiliser dans le monde où nous vivons.

De Galilée à Pasteur, les savants ont développé des outils de plus en plus performants, les microscopes. Mais ces outils, même performants, ont toujours des limites. Ainsi, Pasteur pouvait voir les microbes, mais pas les virus, qui étaient encore trop petits. C'est là le génie de Louis Pasteur d'avoir pu combattre et vaincre un ennemi invisible, le virus de la rage.

Parallèlement aux progrès de la médecine, l'observation de l'infiniment petit a non seulement confirmé l'hypothèse atomique, mais aussi montré des comportements curieux des atomes et des molécules. Par exemple, de l'eau au repos dans un verre nous semble immobile. Observées au microscope, des particules de pollen en suspension dans cette eau sont animées d'un mouvement désordonné, mouvement qui augmente avec la température. C'est pour cela qu'on l'a appelé mouvement d'agitation thermique.

1. Infiniment petit et transfert d'énergie

L'énergie existe sous plusieurs formes : énergie de mouvement ou énergie cinétique, énergie potentielle de pesanteur (plus un corps est élevé au-dessus du sol, plus son énergie potentielle est importante), énergie potentielle élastique, etc.

Mais il est une forme d'énergie, la chaleur, qui est longtemps restée mystérieuse et que la connaissance du comportement des atomes à l'échelle microscopique a permis de comprendre.

Dès qu'il y a des écarts de températures entre deux endroits voisins, il y a transfert de chaleur. Ces transferts peuvent se faire sous trois types.

a) Transfert de chaleur par convection

Ce mode de transfert a lieu dans les fluides. Dès qu'un liquide ou un gaz s'échauffe, il se dilate, devient moins dense et, tout naturellement, se déplace en altitude vers les zones plus froides. La chaleur est ainsi transférée dans un autre par mouvement macroscopique de matière.

b) Transfert de chaleur par rayonnement

Ce transfert a lieu par ondes électromagnétiques dans le domaine de l'infrarouge. On ressent cet apport de chaleur devant un radiateur électrique ou en été au soleil. Ce transfert d'énergie ne nécessite pas de support pour se propager (la chaleur solaire traverse le vide pour nous atteindre).

c) Transfert par conduction

L'étude de ce mode de transfert à l'échelle microscopique a permis de comprendre comment la chaleur se transmettait dans les milieux conducteurs comme les métaux. Les électrons stockent l'énergie calorifique sous forme d'énergie cinétique d'agitation thermique. Ensuite, au cours des chocs contre les ions de la carcasse rigide du métal, ils restituent cette énergie sous forme de chaleur.

2. Résistance thermique

L'Homme moderne est un grand consommateur d'énergie, mais celle-ci est chère. Aussi a-t-on développé des techniques d'isolation pour limiter les pertes (onéreuses) d'énergie. La notion de résistance thermique permet de traiter les écoulements de chaleur comme un problème d'électricité.

Une différence de potentiel $V_2 - V_1$ aux bornes d'une résistance est la cause d'un courant électrique I à travers celle-ci. Loi d'Ohm :

$$V_2 - V_1 = RI$$

Une différence de température $T_2 - T_1$ de part et d'autre d'un mur est la cause d'un courant d'énergie (puissance thermique ϕ) à travers celui-ci. T_1 , T_2 et ϕ sont liés entre par une loi analogue à la loi d'Ohm de l'électricité :

$$T_2 - T_1 = R_{th}\phi$$

où R_{th} est une grandeur que l'on appelle résistance thermique. La résistance thermique dépend des dimensions et du type de matériau traversé par la chaleur.

3. Capacité thermique et énergie interne

Tous les corps n'ont pas la même aptitude à absorber de la chaleur. On caractérise cette aptitude à emmagasiner l'énergie calorifique par la capacité thermique de ce corps, notée C .



Pour une variation de température ΔT d'un corps de capacité thermique C , la quantité de chaleur reçue sera $Q = C\Delta T$.

Cette énergie stockée à l'échelle microscopique par les atomes, les ions ou les molécules s'appelle énergie interne U . Donc, une variation de température ΔT entraînera une variation d'énergie interne :

$$\Delta U = C\Delta T$$

ou encore, si on est en présence d'un corps de masse m et de capacité thermique massique c :

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

L'énergie totale d'un système est donc la somme de ses énergies microscopique et macroscopique :

$$E = U + E_c + E_p$$

4. Interaction des atomes avec la lumière

Les niveaux d'énergie des atomes qui gravitent autour du noyau sont quantifiés. Ces électrons interagissent avec la lumière. Ils peuvent **absorber** ou **émettre** de la lumière suivant des conditions bien précises. Cette émission ou absorption ne se fait pas de façon continue, mais par quantités discrètes, par quantum d'énergie lumineuse.

La longueur d'onde λ d'un photon émis lors d'une transition du niveau i au niveau j est $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = E_i - E_j$ (loi de Planck).

L'émission d'énergie peut se faire selon deux processus.

► Émission spontanée

L'électron dans un état excité perd son énergie spontanément en émettant un quantum d'énergie lumineuse encore appelé photon, la longueur d'onde du photon étant donnée par la loi de Planck.

► Émission stimulée

Pour certains éléments, et à certains niveaux d'énergie, l'émission du photon sera déclenchée par un photon rigoureusement de même énergie. Ainsi, de proche en proche, le nombre de photons émis identiques, sera de plus en plus grande. Le faisceau traversant un milieu contenant des atomes dans ces mêmes états sera amplifié.

5. Effet laser

On peut, grâce à l'émission stimulée, amplifier un faisceau lumineux. Einstein avait émis cette hypothèse. Mais il a fallu attendre plusieurs décennies avant que le premier laser ne fonctionne. Il faut en effet réaliser certaines conditions très rigoureuses pour qu'un amplificateur de lumière fonctionne.

Conditions pour obtenir l'effet laser

- a) Réaliser l'inversion de population par une méthode appelée pompage.
Dans un milieu émetteur, il y a plusieurs centaines de millions d'atomes. Plus il y aura d'atomes, plus il pourra y avoir de photons émis ou absorbés. C'est l'absorption qui l'emporte sur l'émission car, ordinairement, les atomes sont majoritairement dans leur état fondamental : il y aura surtout de l'absorption. Il faudra donc favoriser l'émission en inversant les populations des niveaux. Il faudra donc, dans un laser, une source d'énergie qui « videra » le niveau d'énergie fondamental, donc excitera les atomes pour les amener presque tous dans un état excité. On aura alors inversé les populations des niveaux.
- b) Trouver les bons éléments.
En effet, tous les atomes ne peuvent convenir. Il faut que les électrons restent un temps suffisant dans un niveau excité pour qu'il soit suffisamment peuplé avant qu'un photon ne déclenche l'émission stimulée. Ces niveaux d'énergie particuliers sont des niveaux dits métastables, et tous les atomes n'en possèdent pas.
- c) Afin d'avoir une grande amplification, le faisceau doit passer et repasser dans le milieu amplificateur dans une **cavité** constituée de deux miroirs parallèles dont l'un n'est pas complètement réfléchissant. Pour que le faisceau ne se détruise pas par interférences dans la cavité, celle-ci doit être **résonante**, c'est-à-dire que sa longueur doit être un multiple de la demi-longueur d'onde de la lumière émise.

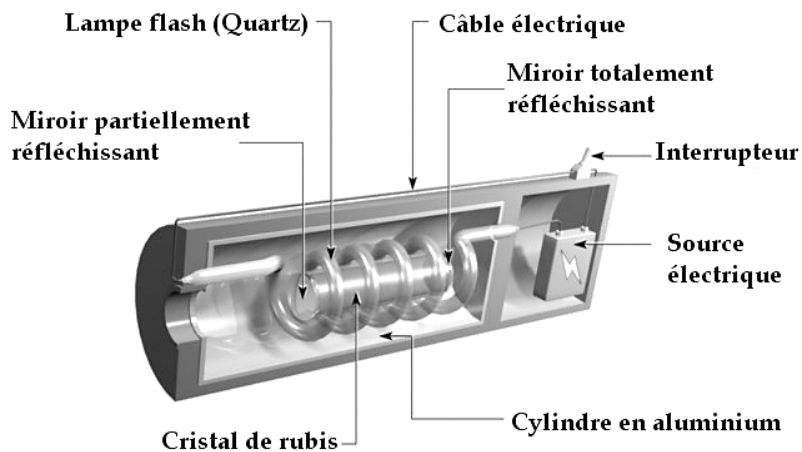


Figure 51 : Laser

Un laser comprendra, comme on peut le voir sur le schéma de la figure 21 :

- Une source d'énergie (lampe flash) qui apporte l'énergie suffisante pour exciter les atomes.
- Un milieu amplificateur où l'on pourra réaliser l'inversion de population, ici le cristal de rubis.
- Une cavité résonante dans laquelle le faisceau pourra s'amplifier, ici les deux miroirs dont l'un sera partiellement réfléchissant afin que le faisceau puisse sortir de la cavité.

Le faisceau laser aura des caractéristiques que l'on n'a pas avec des sources classiques. Il est :

- très intense ;
- très peu divergent. Le pinceau émis sera quasi cylindrique ;
- cohérent. L'amplification se faisant par émission stimulée, tous les photons vibreront en phase. Cette dernière propriété est extrêmement intéressante pour la recherche en physique fondamentale et en télécommunication par exemple.

Les lasers sont très utilisés en recherche scientifique, médicale, dans les applications de pointe et dans la vie courante.

6. La lumière onde et corpuscule

La **lumière** présente un **double comportement** :

- ▶ Comportement **ondulatoire**, qui se manifeste par des phénomènes d'**interférences** et de **diffraction**.
- ▶ Comportement **corpusculaire**, qui se manifeste par l'**effet photoélectrique**.

Les **particules de matière** comme l'électron présentent également un **double comportement** :

- **Corpusculaire** obéissant aux lois de la mécanique énoncées par Newton.
- **Ondulatoire** suggéré par Louis de Broglie (1923) et vérifié expérimentalement par Davisson et Germer (1927).

En conséquence, **un électron possède une onde associée** de longueur d'onde

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \text{ typiquement de l'ordre du nanomètre et en dessous.}$$

On a pu ainsi repousser les limites de l'observation de l'infiniment petit. Si Pasteur avait eu à sa disposition un microscope électronique, il aurait pu voir un virus. Avec un microscope électronique, il est possible de voir un atome, c'est-à-dire un objet de 10^{-10} m.

7. La mécanique quantique

À l'échelle de l'atome, la mécanique classique, que nous utilisons pour étudier le mouvement d'un objet sur une table à coussins d'air, comme nous l'avons fait en classe, n'est plus applicable.

Les expériences d'interférences réalisées avec des électrons nous montrent qu'il n'est plus possible de savoir où l'électron va arriver sur la plaque photographique. On peut simplement dire que la probabilité d'arriver sur une zone restreinte du détecteur est plus grande ou plus petite que sur telle autre zone. La notion de trajectoire n'a plus de signification. Le comportement de l'électron s'étudie à partir de son onde associée. La fonction d'onde associée est étudiée mathématiquement à partir de l'équation de Schrödinger, équation complexe dont l'étude est hors programme.

B

Exercices de synthèse

1. Exercice de type Bac

Exercice 1 Du modèle classique au modèle quantique de l'atome

Le premier atome à avoir été étudié au début du xx^e siècle est l'atome d'hydrogène car c'est le plus simple des atomes. Un électron unique de masse m et de charge $-e$ tourne autour du noyau constitué d'un proton de charge $+e$ et de masse très grande devant celle de l'électron. Dans l'un des premiers modèles, proposé par Niels Bohr, en s'inspirant du mouvement des planètes autour du Soleil, l'électron tourne autour du noyau à vitesse constante, sur une trajectoire circulaire de rayon r . Le mouvement de l'électron est donc circulaire uniforme.

① Analyse classique du mouvement de l'électron

Un électron effectue, à la vitesse v constante, un mouvement circulaire de rayon r autour du noyau supposé immobile.

- Quelle est l'expression de son accélération $\vec{a}$ en fonction de v et de r dans un mouvement circulaire uniforme ? Comment est dirigé le vecteur accélération par rapport au vecteur vitesse $\vec{v}$?
- Donner l'expression, en fonction de k , de e et de r , de la force électrique $\vec{F}$ à laquelle est soumis l'électron de la part du noyau.
- Appliquer à cet électron la deuxième loi de Newton.
- La force électrique $\vec{F}$ à laquelle est soumis l'électron dérive d'une énergie potentielle E_p . Donner l'expression de E_p en fonction de k , de e et de r . Donner également l'expression de E_C en fonction de m et de v , vitesse de l'électron.
- À partir de l'expression de l'énergie cinétique et de l'équation obtenue en c) à partir de la deuxième loi de Newton, montrer que l'énergie cinétique s'exprime sous la forme suivante $E_C = \frac{A}{r}$ où A est une constante dont on donnera l'expression en fonction de k et e . Quelle relation de proportionnalité obtient-on entre E_C et E_p . Montrer alors que l'énergie mécanique a pour expression :

$$E = -\frac{ke^2}{2r}.$$
- Calculer la vitesse de l'électron sur une trajectoire circulaire de rayon $r = 52,9 \text{ pm}$ et le nombre de tours effectués par seconde.

② Condition de quantification

- Dans le modèle classique développé dans la première question, r peut prendre toutes les valeurs possibles dans $\mathbb{R}$. Il en est donc de même pour l'énergie mécanique qui est une fonction de r . Ce résultat contredit que le spectre d'émission de l'atome soit un spectre de raies. Expliquer cette contradiction.
- Nous allons introduire une condition de quantification à partir de l'onde associée à l'électron. L'application numérique de la question ① f) nous montre que l'électron fait un très grand nombre de tours par seconde. Donc, pour que

l'onde associée ne se détruit pas par interférences, il faut que la trajectoire circulaire de l'électron ait une longueur L qui soit un multiple de cette longueur d'onde λ .

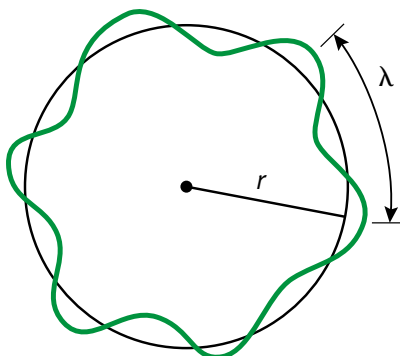


Figure 52

La condition de quantification sera donc : *Sortie numérique* .

Cette équation, dite condition de quantification, ne permet que certaines valeurs discrètes pour r et, par voie de conséquence, pour E .

Rappeler l'expression de la longueur d'onde associée à un électron de masse m animé de la vitesse v . À partir de cette expression et de la condition de quantification, trouver une relation reliant m , v et r , ne faisant plus intervenir λ .

c) À partir de l'expression précédente, et de la deuxième loi de Newton, montrer que la vitesse de l'électron sur son orbite peut se mettre sous la forme : $v = \frac{A}{r}$ avec $A = \frac{2\pi k e^2}{h}$. En déduire l'expression de r sous la forme $r = B n^2$. Donner l'expression de B en fonction de h , de k , de e et de m .

d) En reportant cette expression de r dans celle de l'énergie mécanique obtenue en 1 e), montrer que l'énergie de l'électron est quantifiée et de la forme $E = -\frac{E_0}{n^2}$. Donner l'expression de E_0 en fonction de k , de e , de m et de h .

**Application
numérique
Données
numériques**

Calculer E_0 en joules puis en électron-volts.

- $k = 9.10^9$ SI ; masse de l'électron $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg.
- Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ kg.
- Constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.S.

e) Les mesures des spectres d'émission de l'atome d'hydrogène ont montré que les niveaux d'énergie autorisés pour l'atome d'hydrogène s'expriment en électron-volts :

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

Ce résultat est-il en accord avec le modèle classique auquel on a ajouté la condition de quantification ?

Exercice 2 Étude de documents sur le microscope à force atomique

Document 1 Principe de fonctionnement

Dans un microscope à force atomique, une pointe miniature fixée à l'extrémité d'un cantilever (le terme anglais *cantilever* désigne une pointe suspendue en porte-à-faux) est proche de la surface d'un échantillon placé sur une platine de déplacement (balayage XYZ). Développé par G. Binnig et al. en 1986, le microscope à force atomique (AFM : *Atomic Force Microscope*) est né des considérations suivantes : les interactions entre pointe et surface sont importantes et donnent lieu, selon les distances pointe-surface, à des forces répulsives ou attractives agissant sur la pointe. Par mesure et contrôle de ces forces, un microscope adapté devrait permettre d'imager la topographie de la surface à étudier.

Le microscope à effet tunnel est basé sur le passage d'un courant entre la pointe et l'échantillon, aussi celui-ci doit-il être conducteur. Cette restriction est levée en microscopie de force qui peut être pratiquée sur toutes sortes de matériaux, indépendamment de leurs propriétés électriques.

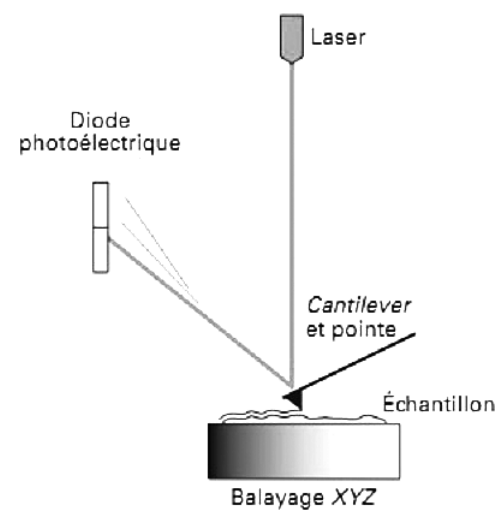


Figure 53 : Principe de fonctionnement du microscope à force atomique

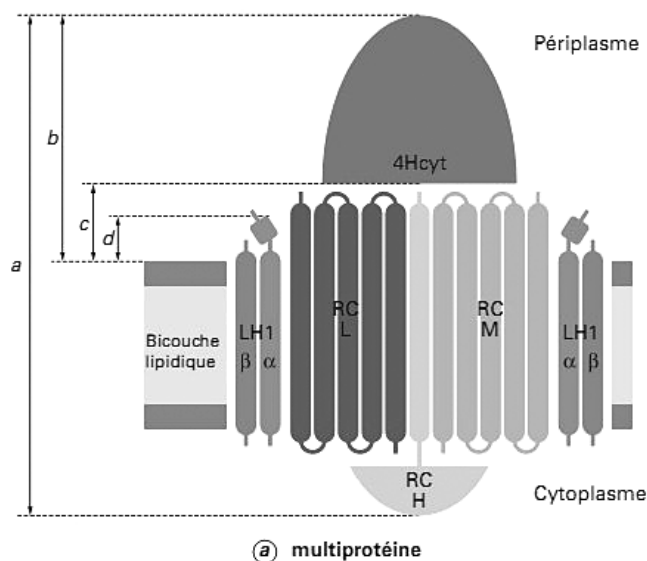
- Nature des forces : l'interaction entre pointe et surface, de nature essentiellement électromagnétique, donne lieu à une grande variété de forces (répulsives, attractives, électrostatiques ou magnétiques, capillarité). Au contact immédiat de la surface, les forces répulsives à courte portée dominant par effet de répulsion coulombienne des nuages électroniques des atomes de la pointe et de la surface. À des distances de l'ordre du nanomètre ou plus, ce sont les forces à plus longue portée qui dominant (forces attractives de van der Waals).
- Intensité des forces mesurables : si l'on considère les forces de contact, répulsives, elles s'exercent de façon prédominante sur une portée de l'ordre de $d = 0,02 \text{ nm}$ et les forces correspondent environ pour ces deux cas limites à 10^{-7} N et 10^{-11} N .

Dans le cas des forces à longue portée, en particulier les forces de van der Waals, typiquement de 10^{-13} N à des distances de l'ordre de 10 nm .

Document 2 Quelques applications du microscope à force atomique

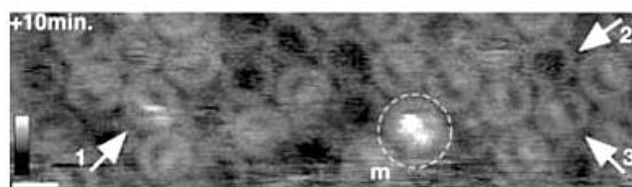
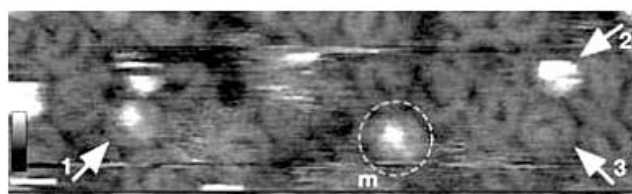
a) En photosynthèse, des assemblées de multiprotéines hautement organisées convertissent la lumière solaire en énergie biochimique avec une grande efficacité. L'AFM permet d'étudier ces complexes. La figure 54a représente une vue schématique du complexe photosynthétique de la multiprotéine (*Rhodospseudomonas vividis*). Les flèches verticales correspondent aux mesures de hauteur en AFM. Celle notée a a été mesurée : $a = 12,4 \pm 0,8$ nm.

La figure 54b montre deux images en champ proche. La barre horizontale correspond à une longueur de 10 nm. Il est possible, comme on le voit ici, de « photographier » la surface de la multiprotéine, avant (photo du haut) et après (photo du bas).



(a) multiprotéine

Figure 54a



(b) images en champ proche

Figure 54b

- b) L'imagerie AFM peut être utilisée pour déterminer quantitativement des conformations de macromolécules flexibles. La figure 55 est une image de molécules d'alginate, molécule fibreuse très longue.

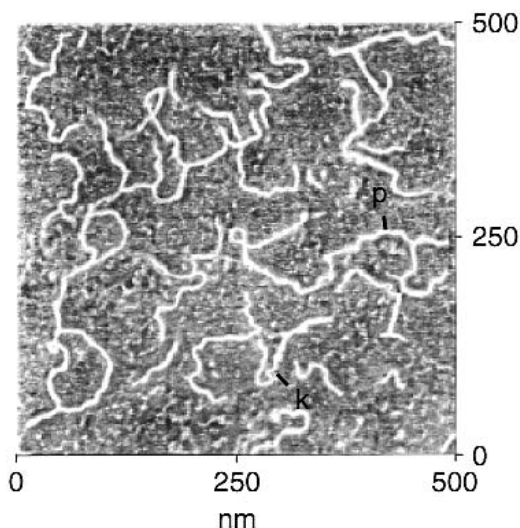


Figure 55

Document 3 La photosynthèse

Les végétaux chlorophylliens sont autotrophes, ce qui signifie qu'ils peuvent produire de la matière organique en utilisant des ressources minérales : de l'eau et des ions provenant de la solution du sol et du CO_2 atmosphérique. La production de matière organique se déroule dans des organites spécifiques, les chloroplastes localisés dans le cytoplasme des cellules des feuilles. D'un point de vue chimique, cette réaction correspond globalement à une oxydoréduction au cours de laquelle le carbone atmosphérique est réduit et l'oxygène de l'eau oxydée. Cette réaction chimique se déroulant à l'encontre des potentiels rédox nécessite de l'énergie. Celle-ci est apportée par l'énergie lumineuse captée par les pigments photosynthétiques.

- ❶ Quel est l'ordre de grandeur de la dimension d'un atome ? Est-il justifié qu'à $d = 0,02 \text{ nm}$, la pointe puisse être en contact avec un atome ? Pourquoi les forces sont-elles alors répulsives ?
- ❷ Y a-t-il contact entre la pointe et la surface pour $d = 10 \text{ nm}$? Pour cette distance, quel type de forces agissent entre la pointe et les atomes de la surface les plus proches ?
- ❸ À partir de la figure schématisant le fonctionnement du cantilever, pouvez-vous expliquer son fonctionnement et l'intérêt de faire réfléchir un pinceau laser sur une barrette de photodiodes ?
- ❹ Expliquer en quelques mots ce que l'on appelle photosynthèse. Avec une résolution identique, pourquoi le microscope à effet tunnel n'est-il pas adapté à ce type d'analyse ?

5 Exploiter l'image de la figure 5. Quel est l'ordre de grandeur du diamètre d'une fibre ? La pointe du cantilever ayant, à sa pointe, une largeur correspondant au $1/10^{\text{e}}$ de celui du diamètre d'une fibre, pouvez-vous justifier si la largeur à la pointe est composée de :

- moins de 10 atomes ?
- entre 10 et 20 atomes ?
- plus de 20 atomes ?

