

Chapitre 1 : la physique, généralités

1 La physique, introduction

➤ 1.1 La physique, définition

La physique a pour objet l'étude des propriétés de la matière et des lois qui la régissent, c'est-à-dire de l'ensemble des « règles du jeu » du monde matériel qui nous entoure.

Les physiciens observent, mesurent et modélisent le comportement et les interactions de la matière et des rayonnements à travers l'espace et le temps.

➤ 1.2 La physique, une science exacte

La *réalité* du monde physique peut être *décrite*, et ses processus prédits à l'aide de *représentations mathématiques*.

➤ 1.3 Champ d'action de la physique et rapport de la physique avec les autres sciences

2 Méthode de la physique

➤ 2.1 Les notions

Une *notion* est une *idée*, une *grandeur physique* utilisées pour analyser les phénomènes physiques.

Par exemple, l'*idée* abstraite d'*espace* est une notion, de même que la *grandeur physique* mesurable appelée *longueur*.

➤ 2.2 Les lois et les principes

Par l'*expérimentation* et l'*observation* ou par l'*analyse théorique*, le physicien essaie d'établir des *relations entre les grandeurs physiques*. Ces relations qui peuvent être mathématiques, sont appelées *lois*.

Exemple : la *deuxième loi de Newton* exprime la relation qui existe en Physique classique entre les grandeurs « force » et « accélération ».

Les lois peuvent être limitées à un certain domaine de la Physique (cf. l'exemple ci-dessus), *certaines d'entre elles ont une portée très générale* sur le fonctionnement de la Physique, ce sont des *principes*.

Exemple : le *principe de la conservation de l'énergie*,

➤ 2.3 Les modèles

Un *modèle* est une *analogie* ou une *représentation pratique* d'un *système physique*.

Exemples de modèles :

- le *modèle géocentrique* a perduré jusqu'à Copernic au XVI^{ème} siècle,
- le *modèle planétaire de Bohr* pour l'atome d'hydrogène marque une étape intermédiaire avant la victoire de la théorie quantique,

➤ 2.4 Les théories

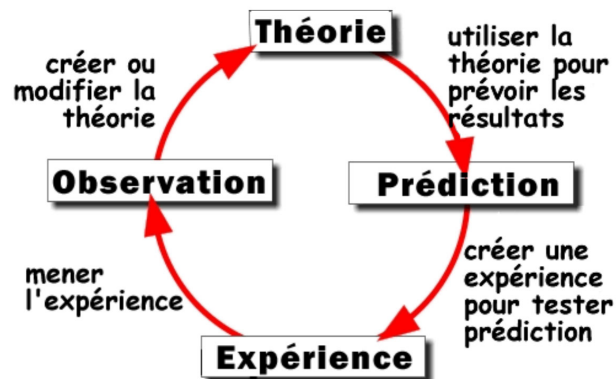
Une *théorie* rassemble les *notions*, les *principes*, un *modèle*, des *postulats* (hypothèses de départ) pour tirer des conclusions particulières ou des *lois*.

Une théorie doit être *descriptive* et *prédictive* et sa *validité dépend* en fin de compte de la *vérification expérimentale* de ces prévisions.

Exemple : la *théorie de la gravitation de Newton* est très précise et permet, par exemple, de lancer des satellites jusqu'aux confins du système solaire (capacité prédictive), comme d'expliquer les anneaux torsadés de Saturne (capacités descriptives).

➤ 2.5 La méthode scientifique

La *méthode scientifique* permet de *confirmer* ou d'*infirmer* les *hypothèses* et d'*établir* les *lois* d'une *théorie* donnée.



3 Domaines de la physique

Chapitre 2 : énergie, matière et rayonnements, aspects historiques et notions scientifiques générales

1 Introduction générale

- 1.1 Point de départ
- 1.2 Organisation générale du cours et légende des diapositives

2 Imaginaire de l'énergie

3 Introduction à la notion scientifique d'énergie

- 3.1 L'homme et l'énergie

L'*énergie* est un concept relié à ceux d'action, de *force* et de *durée* : la mise en œuvre d'une action nécessite de maintenir une certaine force pendant une durée suffisante, pour vaincre les inerties et résistances qui s'opposent à ce changement. L'énergie qui aura été nécessaire pour accomplir finalement l'action envisagée rend compte à la fois de la force et de la durée pendant laquelle elle aura été exercée.

Après avoir exploité sa *propre force* et celle des *animaux*, l'homme a appris à exploiter les *énergies contenues dans la nature* (d'abord les vents, énergie éolienne et les chutes d'eau, énergie hydraulique).

Ces énergies furent capables de lui fournir une *quantité croissante de travail mécanique par l'emploi de machines* : machines-outils, chaudières et moteurs.

L'*énergie* est souvent *fournie par un carburant* (liquide ou gazeux, énergie fossile ou non).

- 3.2 Étymologie du terme « énergie »

4 Introduction aux autres grands acteurs du monde physique

- 4.1 La matière

La *matière* est la *substance qui compose tout corps ayant une réalité tangible*.

La matière occupe de l'*espace*, peut se déplacer dans l'*espace (mouvement)* et possède une *masse*.

Mais *qu'est-ce que la masse ?*

Pour ce qui est de l'*espace occupé par la matière* c'est aussi un concept très vague. *L'atome est essentiellement constitué de vide*.

- 4.2 Rayonnements

Un *rayonnement*, synonyme de *radiation*, désigne le *processus d'émission ou de transmission d'énergie* impliquant une *onde* ou une *particule porteuse*.

➤ 4.3 Ondes

Une *onde* résulte de la *propagation* dans une *large zone spatiale* (en comparaison des dimensions propres des particules qui composent la matière) d'une *perturbation temporaire*.

Cette *perturbation* peut être *de passage (onde progressive)* ou bien d'une *perturbation qui se maintient* dans le milieu (*onde stationnaire*).

Le terme « *perturbation* » désigne une *grandeur physique* dont la *valeur s'écarte* (augmente ou diminue) de celle possédée initialement dans un *état d'équilibre*.

Cette *perturbation* produit une *variation réversible* (oscillation ou vibration) de *propriétés physiques locales* du milieu.

L'onde ne transmet pas de la matière mais de *l'énergie* dont la valeur dépend de la nature de la perturbation et de son intensité.

Exemples d'ondes :

- les *ondes mécaniques* où se propage un *état de tension*, de *pression* ou de *vitesse* ;
- les *ondes électromagnétiques* où se propage un *état de champs électrique et magnétique* ;

5 L'énergie, c'est quoi ?

➤ 5.1 En fait, c'est compliqué...

« *Il est important de réaliser que dans la physique d'aujourd'hui nous n'avons aucune connaissance de ce que l'énergie est.* » (R. Feynman Prix Nobel de physique 1965)

➤ 5.2 Une approche historique : la recherche de la constance

Selon Roger Balian, la *meilleure façon de définir l'énergie*, c'est d'utiliser une *approche historique*. Il se trouve que, historiquement, c'est justement la recherche de la *constance dans le mouvement* qui a mené à l'élaboration de ce concept.

6 Prémises de la notion d'énergie en mécanique

La *mécanique* est une branche de la physique dont l'objet est l'*étude du mouvement*, des *déformations* ou des *états d'équilibre* des systèmes physiques.

➤ 6.1 La mécanique avant Newton

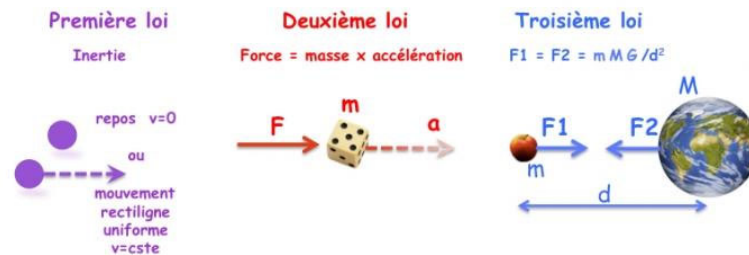
➤ 6.2 La mécanique (sans énergie) de Newton

En 1687, Isaac Newton publie ses « *Philosophiae naturalis principia mathematica* » dans lesquels il énonce *trois lois* bien connues régissant le mouvement des objets.

Dans ces ouvrages, il formalise le *concept de force*, une notion intuitive qui remontait à la nuit des temps. La *force* est un concept fondamental de la physique ; c'est la *cause de la déformation d'un corps* ou de la *modification de son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme*.

Newton lui-même n'a jamais évoqué le concept d'énergie sous aucune forme.

Lois de Newton



➤ 6.3 Notions de masse

La *masse inerte* (inertielle) d'un corps est la *grandeur physique utilisée pour calculer la force nécessaire pour qu'un corps acquière une accélération, en fonction de celle-ci*. C'est la *quantification de la résistance du corps aux accélérations*. Cette masse inerte a été considérée comme une *mesure de la quantité de matière du corps* depuis Isaac Newton jusqu'à l'avènement de la relativité restreinte.

La *masse grave* (gravifique, gravitationnelle) est la *grandeur physique intervenant dans le calcul de la force de gravitation créée ou subie par un corps*.

Deux corps de masses respectives m_1 et m_2 s'attirent avec des forces de mêmes valeurs (mais vectoriellement opposées), proportionnelles à chacune des masses, et inversement proportionnelle au carré de la distance d qui les sépare. Cette force a pour direction la droite passant par les centres de gravité de ces deux corps. G est la *constante gravitationnelle*, elle vaut dans les unités SI :

$$G = 6,67384 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

Ces deux grandeurs sont a priori distinctes, mais leur égalité est expérimentalement vérifiée à un millième de milliardième c'est-à-dire 10^{-12} près ; on se permet dès lors de parler de la masse d'un corps.

➤ 6.4 Masse et poids

La *masse* d'un objet mesure simplement la *quantité de matière contenue dans cet objet*. Cette *quantité de matière (donc la masse)* sera la même quel que soit l'endroit où se trouve l'objet dans l'univers. L'unité de masse est le kilogramme (kg).

Le *poids* mesure, lui, la *force d'attraction qu'exerce un astre sur un objet* ce qui signifie que le poids d'un objet varie dans l'univers et dépend de l'astre où il se trouve. L'unité de poids est le Newton (N).

- 6.5 Premières mises en situation en mécanique autour de la « constance de quelque chose »

Pour un levier, le « quelque chose » qui est conservé, est le *produit de la force par la distance parcourue*.

Une *balle lancée verticalement à une vitesse donnée revient au lanceur après sa descente avec une vitesse égale à sa vitesse initiale*. « Quelque chose » a donc été donné à la balle au départ et ce « quelque chose » semble être le même à son retour.

Ces exemples illustrent les *prémisses du concept d'énergie* : « quelque chose » est conservée dans les expériences de mécanique et ce quelque chose, c'est l'énergie.

- 6.6 La mécanique après Newton et la recherche de constantes

La nature est telle qu'une certaine quantité est toujours conservée.

En effectuant des expériences de *collisions*, Descartes a établi que, *dans certaines circonstances*, la *quantité scalaire $m.v$* (produit de la masse et de sa vitesse) était conservée. Il énonce ainsi son *principe de conservation de la « force »* et nomme la quantité $m.v$ « *quantité de mouvement* ». La *conservation de la quantité de mouvement* est en fait une *conséquence directe des équations du mouvement de Newton*.

Pour Leibniz, la *véritable valeur d'une force* devait se mesurer par une *quantité* qu'il nomme *vis viva (force vive)*, définie comme le *produit de la masse avec le carré de sa vitesse* : $m.v^2$.

- 6.7 La « vis viva », presque l'énergie cinétique

L'introduction du mot *énergie* pour designer la *vis viva* est due à *Thomas Young*. *Young définit donc l'énergie associée à la vis viva par :*

$$E = mv^2$$

- 6.8 Notion de travail d'une force

En mécanique, on parle de *travail* lorsqu'on applique une *force* sur un objet pour le *déplacer*. Le *joule (J)* est le *travail d'une force d'un newton dont le point d'application se déplace de 1 m selon la direction de la force*.

- 6.9 La puissance d'une force

Quand une force travaille, elle transfère de l'énergie à un système. Ce transfert peut s'effectuer plus ou moins vite. C'est là qu'intervient la *puissance d'une force* : elle rend compte de la rapidité de ce transfert d'énergie.

La *puissance moyenne P_m* d'une force est égale au rapport du travail $W(\vec{F})$ (en joules) de cette force et de la durée Δt (en secondes) mise pour effectuer ce travail. Elle est exprimée en watts (W).

$$P_m = \frac{W(\vec{F})}{\Delta t}$$

➤ 6.10 L'énergie cinétique, enfin

L'énergie cinétique, notée E_c (ou K , dans les textes en anglais), est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement par rapport à un référentiel donné. Sa valeur dépend donc du choix de ce référentiel. Elle s'exprime en joules (J). Dans les cas non relativistes (c'est-à-dire lorsque les vitesses sont petites comparées à la vitesse de la lumière dans le vide), l'énergie cinétique E_c (en J) d'un point matériel de masse m (en kg) se déplaçant à une vitesse v (en m/s) dans un référentiel donné s'exprime ainsi :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

7 Théories primitives de la matière

➤ 7.1 Théories antiques

➤ 7.2 La naissance de la chimie

Principe de *Lavoisier* qui constitue le *principe de conservation de la matière* : « pendant une réaction chimique, les liaisons entre les éléments chimiques changent, mais on retrouve les mêmes quantités des mêmes éléments dans les espèces chimiques formées (les produits de la réaction) que dans les espèces qui ont été consommées (les réactifs) ».

La *loi des proportions définies* est une loi pondérale énoncée par *Joseph Louis Proust* : « Lorsque deux ou plusieurs corps simples s'unissent pour former un composé défini, leur combinaison s'effectue toujours selon un même rapport pondéral ». Cette loi constitue, avec la loi des proportions multiples, la base de la stœchiométrie en chimie.

Étant donné un composé chimique constitué de deux éléments A et B, par exemple l'oxygène et l'azote, r est le rapport $m(A)/m(B)$ des masses de A et B mesurées pour une certaine quantité de ce composé. Considérons deux composés chimiques différents de A et B, avec les rapports respectifs r_1 et r_2 . La *loi des proportions multiples* de *John Dalton* s'énonce : « Le rapport r_1/r_2 est égal au rapport de deux nombres entiers petits ».

La théorie atomique moderne est née des travaux du physicien et du chimiste anglais *John Dalton*. En 1803, Dalton présente un mémoire sur l'absorption des gaz par les liquides, et utilise l'hypothèse selon laquelle *la matière est composée de particules ultimes, identiques et indivisibles* : les atomes.

La première hypothèse de sa théorie stipule que toute matière est composée d'atomes qui sont eux-mêmes indivisibles.

La seconde hypothèse de la théorie précise que tous les atomes d'un élément donné possèdent la même masse et les mêmes propriétés.

La troisième hypothèse énonce que les composés sont des associations d'au moins deux types d'atomes différents.

La quatrième hypothèse de la théorie stipule qu'une réaction chimique correspond à un réarrangement d'atomes.

8 Les théories de la chaleur et l'histoire de l'énergie

➤ 8.1 Introduction historique : la chaleur et la température

Il est *très courant de confondre la chaleur et la température*. Ces notions sont liées, mais à différencier quand même.

➤ 8.2 Notion de température

Pour *évaluer la température* d'un corps il suffit de la *rattacher à un phénomène mesurable et continu*, lié aux variations de température du corps. La température d'un corps se mesure avec un *thermomètre*. Il existe différents types de thermomètres, chacun utilise une grandeur physique qui varie avec la température, par exemple les thermomètres à liquides basés sur la *dilatation des liquides*.

Il existe 3 échelles de température : Celsius, Fahrenheit et Kelvin.

Échelles	Température de la glace fondante	Température de l'eau bouillante
Celsius	0°C	100°C
Fahrenheit	32°F	212°F
Kelvin	273,15°K	373,15°K

➤ 8.3 Notion de chaleur

• 8.3.1 Equilibre thermique de deux corps

Si on met en contact un corps froid avec un corps chaud, *la température du corps chaud va diminuer alors que celui du corps froid va augmenter*.

Et ceci jusqu'au moment, où les deux corps seront à la même température. On dit alors qu'il y a *équilibre thermique* des deux corps.

• 8.3.2 Nature de la chaleur

À propos de la *nature de la chaleur*, il y eut longtemps *opposition de deux grandes visions* : une *théorie matérialiste (chaleur substance)* et une *théorie cinétique (la chaleur est associée au mouvement)* qui devait s'avérer exacte.

➤ 8.4 Retour sur la distinction chaleur-température

La *chaleur*, c'est la *quantité d'énergie thermique contenue dans un corps* et qu'il est possible d'extraire pour s'en servir (pour chauffer par exemple). Nous verrons que la *température* mesure en fait l'agitation des atomes. C'est sa *vitesse de vibration* au sein de la structure solide qui la contient, ou bien sa *vitesse de déplacement* dans un gaz.

➤ 8.5 Définition de la calorie

La *définition améliorée* (calorie à 15 °C) spécifie la calorie comme la *quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 gramme d'eau dégazée de 14,5 °C à 15,5 °C sous pression atmosphérique normale. Une calorie équivaut à 4,1855 Joule.*

➤ 8.6 Capacités calorifiques sans changement d'état

Chaque substance subit une variation de température spécifique ΔT en recevant une quantité déterminée de chaleur Q . On a $Q = m c \Delta T$ où c est la *capacité calorifique massique* de la substance considérée exprimée en $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ ou $(\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$.

➤ 8.7 Notion de pression macroscopique

A cause de l'agitation thermique, les *particules microscopiques* d'un fluide (molécules ou atomes) viennent constamment *percuter les parois* d'un volume V du récipient ou de l'enceinte où est placé le fluide. Les *chocs continus contre les parois* où ce fluide est enclos se traduisent à l'échelle macroscopique par une *force* s'exerçant *perpendiculairement* à chaque surface élémentaire de cette paroi : le *rapport* de la valeur numérique de cette *force* à l'*aire* de cette surface élémentaire mesure la *pression* P exercée par le fluide sur la paroi au centre de la surface élémentaire. La pression est donc la *force exercée par unité de surface*.

F	P en pascal (Pa)
$P = \frac{F}{S}$	F en newton (N)
S	S en mètre carré (m^2)

L'air de l'atmosphère étant *pesant* (environ 1,3 g/l au niveau de la mer), il exerce à la surface de la terre une *pression* d'environ 1 kg/cm^2 .

La *pression atmosphérique* est la pression de l'air en un point quelconque de l'atmosphère. La pression atmosphérique *varie de point en point à la surface de la Terre et évolue aussi au fil du temps*. On la mesure en météorologie en *hectopascal* (hPa) ou millibar sachant que $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ (100 Pascal) = 1mbar.

9 Organisation de la matière à l'échelle macroscopique

➤ 9.1 États ou phases de la matière

Au niveau macroscopique, la matière est présente autour de nous sous *trois formes* ou plus exactement *trois états* : *solide, liquide et gazeux*.

➤ 9.2 État solide

L'*état solide* est un des états de la matière caractérisé par l'*absence de liberté* entre les atomes, molécules ou les ions (métaux par exemple).

Les *critères macroscopiques* de la matière à l'état solide sont :

- ✓ le solide a une *forme propre*,
- ✓ le solide a un *volume propre*.

Si un objet *solide est ferme*, c'est grâce aux *liaisons* entre les atomes, ions ou molécules composants du solide.

➤ 9.3 État gazeux

Un *gaz* est un ensemble d'atomes ou de molécules *très faiblement liés* et quasi-indépendants. Dans l'état gazeux, la matière n'a *pas de forme propre ni de volume propre* : un gaz tend à occuper tout le volume disponible. Il est facilement *compressible*.

➤ 9.4 État liquide

La *phase liquide* est un état de la matière facilement déformable mais difficilement compressible.

Le liquide est une forme de *fluide* : les molécules sont faiblement liées, ce qui rend les liquides parfaitement déformables. La forme liquide correspond à une *forme de moindre énergie que le gaz mais d'énergie supérieure à la forme solide*.

À l'état macroscopique, on caractérise l'état liquide par les critères suivants :

- ✓ le liquide n'a pas de forme propre, il prend celle du récipient sous l'effet de la gravité ;
- ✓ sa surface libre au repos est plane et horizontale dans un champ de gravité uniforme
- ✓ le liquide possède un volume propre, qui ne change qu'avec la température et, en général, peu.

➤ 9.5 Transitions de phase ou changements d'états

Une *transition de phase* est une transformation du système étudié provoquée par la *variation d'un paramètre extérieur particulier* (température, pression, champ magnétique...).

Cette transition a lieu *lorsque le paramètre atteint une valeur seuil* (plancher ou plafond selon le sens de variation). La transformation est un *changement des propriétés du système*.

➤ 9.6 Paliers de température pendant les changements d'état

Un apport de chaleur ne fait pas toujours augmenter la température. Ce n'est pas toujours vrai : prenez un glaçon à 0°C. Si vous le chauffez, il restera à 0°C mais il va fondre. *La chaleur de l'eau composant le glaçon a augmenté, mais sa température n'a pas changé*. Le truc c'est que *le passage de l'état solide à l'état liquide consomme de la chaleur* (cette chaleur-là est *nommée enthalpie de changement d'état, ou chaleur latente*) : l'eau va donc fondre plutôt que monter en température.

➤ 9.7 Chaleur(s) latente(s)

La quantité de chaleur nécessaire pour faire passer 1kg de substance, à son point de fusion, de l'état solide à l'état liquide est la chaleur latente de fusion L_f qui s'exprime en énergie par unité de masse (J/kg) avec $Q \geq 0$ pour la fusion (on apporte de la chaleur) et $Q \leq 0$ lors de la solidification.

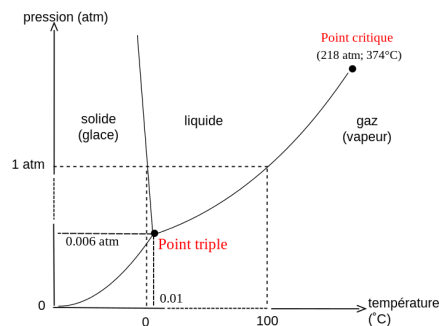
$$Q = \pm L_f m$$

On définit la chaleur latente de vaporisation, L_v , comme la quantité d'énergie thermique nécessaire pour transformer en vapeur 1 kilogramme d'un liquide à température constante ou bien la quantité d'énergie thermique qu'il faut extraire de 1 kilogramme de vapeur pour le condenser dans les mêmes conditions. Cette température est habituellement le point d'ébullition.

$$Q = \pm m L_v$$

➤ 9.8 Diagramme des phases d'un corps pur

Un *diagramme de phases* est une représentation graphique utilisée en thermodynamique, généralement à deux ou trois dimensions, représentant les *domaines de l'état physique* (ou phase) d'un système (corps pur ou mélange de corps purs), *en fonction de variables* choisies pour faciliter la compréhension des phénomènes étudiés. Les diagrammes les plus simples concernent un corps pur avec pour variables la température et la pression.



Le *point triple* est un point du diagramme de phase qui correspond à la *coexistence de trois états* (liquide, solide et gazeux) d'un corps pur. Il est *unique* et s'observe seulement à *une température et une pression données*. Par exemple : le point triple de l'eau est à : $T = 273,16 \text{ K}$ (soit $0,01 \text{ °C}$) et $P = 611 \text{ Pa}$ (soit $0,006 \text{ atm}$).

10 L'étude macroscopique des gaz et la théorie d'Avogadro

- 10.1 Introduction historique
- 10.2 Première hypothèse d'Avogadro : nombre d'Avogadro

Selon Avogadro, le *volume occupé par un gaz* (dans des conditions fixées de température et de pression) est *toujours le même, quel que soit le gaz* ; il est *directement proportionnel au nombre de molécules présentes* dans ce gaz.

Le *volume* qu'occupe un *nombre de molécules fixé* d'un gaz (par exemple une mole, qui comme nous le rappellerons correspond à $6,02 \times 10^{23}$ molécules) *ne dépend pas de la nature du gaz*.

Une mole de gaz parfait occupe approximativement un volume de *22,4 litres* aux conditions normales de température et de pression (*CNTP*), ce qui correspond à une pression d'une atmosphère, soit $101\,325 \text{ Pa}$ et une température de 0 °C .

- 10.3 Deuxième hypothèse d'Avogadro

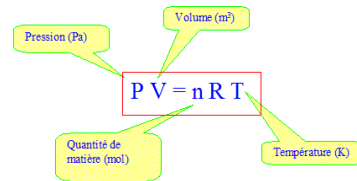
Comment comprendre que le volume de gaz produit dans une réaction chimique soit dans certains cas plus petit que la somme des volumes des gaz qui se sont combinés ? Si l'on admet que les molécules, c'est-à-dire les plus petites particules possibles d'un gaz, peuvent être formées de deux ou plusieurs « molécules élémentaires » (que nous appelons aujourd'hui « atomes »), les choses s'éclairent. Lors d'une réaction chimique, les molécules se divisent en leurs constituants (les atomes) qui se recombinaient différemment.

➤ 10.4 Lois macroscopiques des gaz parfaits

Un *gaz parfait* est un gaz dont les molécules n'ont aucune action mutuelle.

Le comportement des gaz - unité facultative
Résumé des lois des gaz

Relation ou loi des gaz	Énoncé littéral	Formule mathématique	Type de graphique
Loi de Boyle ou Boyle-Mariotte Relation V-P	$V \propto 1/P$ (T et n constants)	$P_1 V_1 = P_2 V_2$	
Relation P-T	$P \propto T$ (V et n constants) T (K)	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$	
Loi de Charles ou Gay-Lussac Relation V-T	$V \propto T$ (P et n constants) T (K)	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	
Hypothèse d'Avogadro Relation volume-quantité (V-n)	$V \propto n$ (P et T constants)	$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$	
Loi des gaz parfaits		$PV = nRT$	



Pour ne pas oublier la formule



$PV = nRT$: "Les Procès Verbaux Nous Raflent Tout"

➤ 10.5 Déboires et triomphe de l'hypothèse atomique

➤ 10.6 Bilan de la théorie atomiste

Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ? Je pense que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) que toutes les choses sont faites d'atomes - petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion. (extrait du « Cours de physique de Feynman »)

11 Organisation de la matière à l'échelle microscopique

➤ 11.1 Corps purs et mélanges

Un *corps pur* est un corps ne comportant qu'une seule espèce chimique, à la différence d'un *mélange* qui comporte plusieurs espèces chimiques.

Une *espèce chimique* est une appellation générique se référant à un ensemble d'entités chimiques identiques.

➤ 11.2 Molécules et atomes

La *molécule* est la plus petite partie d'un *corps pur* susceptible d'exister à l'état isolé en gardant les caractères de ce corps.

Un *atome* est la plus petite partie à l'état électrique neutre d'un corps pur simple pouvant se combiner chimiquement avec une autre. Il est susceptible d'entrer dans les combinaisons chimiques avec d'autres atomes pour constituer des molécules.

➤ 11.3 Mélanges

Un *mélange* est une *association de deux ou plusieurs substances* solides, liquides ou gazeuses qui *n'interagissent pas chimiquement*.

On distingue *deux grands types* de mélanges :

- ✓ les *mélanges hétérogènes*, qui comportent *plus d'une phase* visible à l'œil nu.
- ✓ les *mélanges homogènes*, qui ne comportent qu'*une seule phase* visible à l'œil nu.

➤ 11.4 Classification des corps purs

Un corps pur simple peut être de deux nature différentes :

- ✓ Un *corps pur simple élémentaire*, où les atomes ne sont pas organisés en molécules. C'est le cas par exemple des métaux comme le fer, le cuivre, etc.
- ✓ Un *corps pur simple moléculaire*, où les atomes sont organisés en molécules. C'est le cas du dihydrogène (H_2), du diazote (N_2), du dioxygène (O_2), de l'ozone (O_3), etc.

➤ 11.5 Les éléments chimiques

L'*élément chimique* est un concept simple qui permet de différencier les *constituants fondamentaux de la matière*, les atomes. En effet, ce qui va faire les *propriétés chimiques* (et non physiques) d'un atome (isolé ou dans une molécule), va être le nombre de particules qui le composent, particulièrement le nombre de protons et le nombre d'électrons.

Les éléments chimiques sont communément classés dans une table issue des travaux du chimiste russe *Dimitri Mendeleïev* et appelée « *tableau périodique des éléments* ».

Parmi les éléments chimiques, *94 éléments se rencontrent dans le milieu naturel*.

L'univers est principalement constitué d'atomes d'*hydrogène* et d'*hélium*. Les autres éléments représentent *moins de 1% de la matière visible*.

12 L'équivalence de la chaleur et du travail mécanique

Les forces non-conservatives sont dites aussi *dissipatives*. Elles dissipent en effet l'énergie mécanique d'un corps en la convertissant en chaleur. On peut donc établir un

équivalent mécanique de la chaleur, ou plus exactement un *équivalent thermique de la perte d'énergie mécanique*. L'énergie mécanique macroscopique d'un corps est alors changée en énergie d'agitation microscopique du corps et des autres corps qui ont frotté sur lui.

Joule établit que *la chaleur nécessaire pour augmenter de 1°C la température d'une masse de 1 kg d'eau liquide est égale un travail de 4187 J*.

13 L'énergie potentielle, le chaînon manquant pour la conservation de l'énergie mécanique

➤ 13.1 Historique

La reconnaissance de la *chaleur comme une forme d'énergie* est une révolution extraordinaire qui a permis d'*étendre le domaine de validité de la loi de conservation de la vis viva*.

Malgré cela, il demeurait de trop nombreuses situations où *la perte de vis viva* (par frottement ou autre processus) *ne pouvait être expliquée par un simple gain de chaleur du milieu*. Deux choix s'imposaient alors :

- ✓ *soit la conservation de la vis viva — de l'énergie — est une idée absurde, pas vraiment fondamentale,*
- ✓ *soit une contribution importante à l'énergie restait à découvrir.*

Il faut admettre, sinon de renverser la théorie, que *la vis viva est « emmagasinée » dans une sorte réservoir pour ensuite être « relâchée »*.

C'est là l'essence même de la *notion d'énergie potentielle*. Le *développement de ce concept* est principalement dû aux *réalisations de la physique-mathématique*.

➤ 13.2 Conservation de l'énergie mécanique

Pour tout système conservatif, la quantité appelée énergie mécanique, somme de l'énergie cinétique et des énergies potentielles, se conserve au cours du mouvement.

➤ 13.3 Méthode de Lagrange appliquée au pendule simple

➤ 13.4 Ecriture de l'hamiltonien du pendule simple

➤ 13.5 Exemples de calculs d'énergies potentielles

L'énergie potentielle de gravité à la hauteur h vaut :

$$E_p(h) = m \cdot g \cdot h$$

L'énergie potentielle élastique, notée E_{pe} et exprimée en joules, dépend de x (allongement ou raccourcissement du ressort par rapport à la longueur au repos de celui-ci) en mètres et de la constante de rappel ou de raideur k du ressort, exprimée en newtons par mètre (N/m) selon la relation :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2$$

14 Notion générale d'énergie : vocabulaire et conservation

- 14.1 Historique et vocabulaire
- 14.2 L'énergie, la définition actuelle

L'énergie est une *grandeur caractérisant un système* et exprimant sa *capacité à modifier l'état d'autres systèmes* avec lesquels il entre *en interaction*.

Elle mesure donc la *capacité d'un système à modifier l'état d'un autre système*, à *produire sur lui un travail mécanique*, à y entraîner l'apparition d'un *mouvement*, d'un *rayonnement électromagnétique* ou de la *chaleur*.

C'est une *grandeur physique* qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale *conservée au cours des conversions*.

- 14.3 Principe de conservation de l'énergie et symétries

15 Théorie cinétique des gaz

- 15.1 Mouvement brownien
- 15.2 La température comme une mesure de l'agitation thermique microscopique

Dans l'air ou dans un fluide quelconque, la *température* est une *mesure de la vitesse moyenne des molécules*.

Plus elles possèdent d'énergie, plus leur mouvement est rapide et plus la température de l'air ou du fluide est élevée.

- 15.3 Notion de pression cinétique
- 15.4 Lien entre la température et la vitesse quadratique moyenne

On obtient la relation suivante reliant la température absolue à la moyenne du carré de la vitesse :

$$v^* = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3kT/m}.$$

où l'on a introduit la *constante de Boltzmann* $k=R/N_A=1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

- 15.5 Loi des gaz parfaits microscopique et différentes formes de cette loi
- 15.6 Introduction au facteur de Boltzmann
- 15.7 Nombre d'Avogadro et notion de mole

La mole, (symbole mol), est l'unité de quantité de matière d'une entité élémentaire spécifique, qui peut être un atome, une molécule, un ion, un électron ou n'importe quelle autre particule ou groupe particulier de ces particules ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ quand elle est exprimée en mol^{-1} .

La masse molaire d'une substance correspond à la masse d'une mole (c'est-à-dire d'une quantité de matière contenant le même nombre d'entités que le nombre d'Avogadro) de cette substance.

On définit l'*unité de masse atomique (uma., ou Dalton Da)* (masse atomique relative) comme étant *1/12 de la masse atomique de l'isotope ^{12}C du carbone.*

- 15.8 Distribution énergétique des systèmes en équilibre thermique : distribution de Boltzmann
- 15.9 Distribution de vitesses de Maxwell

16 Les ondes, généralités

- 16.1 Origine et propagation d'un signal

Un *signal* (ou une *impulsion*) est une *déformation localisée et de courte durée* d'un milieu continu et élastique.

Cette déformation *ne reste pas localisée* à l'endroit où elle est produite, mais elle se déplace après sa création, dans le milieu élastique : ce phénomène de déplacement est appelé *propagation*.

Après le passage du signal/impulsion *le milieu reprend son état initial.*

Le point de départ du signal est la *source* ; la direction et le sens dans lesquels il se déplace constituent la *direction* et le *sens de propagation*.

Le signal ne fait que déplacer temporairement la matière. Celle-ci reviendra à sa position d'équilibre après le passage du signal, le passage du signal s'accompagne d'un *transport d'énergie sans transport de matière.*

Si, lors du passage de la déformation, les différents points du milieu se déplacent *perpendiculairement à la direction de propagation*, la déformation est un *signal transversal*.

Si, lors du passage de la déformation, les différents points du milieu se déplacent *dans la direction de propagation*, la déformation est un *signal longitudinal*.

- 16.2 Origine et propagation d'un phénomène ondulatoire

Si la perturbation dure suffisamment longtemps et se répète à l'identique (un *grand nombre de cycles d'oscillation*), le phénomène sera décrit en termes de *propagation d'onde périodique*.

Une *onde continue ou périodique* a donc pour origine une *vibration qui se répète un grand nombre de fois.*

Une onde est une *série de signaux ou d'impulsions identiques qui se suivent à des intervalles de temps réguliers* ; elle peut être *transversale ou longitudinale*, en fonction de la nature des signaux.

Après le passage de l'onde, le *milieu reprend son état initial*. Comme pour les autres types d'ondes, il n'y a *pas de déplacement de matière* dans l'espace, mais bien un *transfert d'énergie* depuis la source jusqu'au récepteur.

Il faut bien distinguer :

- ✓ le *mouvement vibratoire de chaque élément du milieu* (mouvement périodique de chaque particule du milieu autour de sa position d'équilibre) ;
- ✓ la *propagation de ce mouvement vibratoire dans le milieu* (transmission du mouvement vibratoire de proche en proche, d'une particule du milieu à ses voisines).

➤ 16.3 Célérité d'un signal ou d'une onde

On appelle *célérité c* la *vitesse de propagation* d'un signal ou d'une onde. Dans un milieu homogène donné, pour chaque type d'ondes, la *célérité c est constante*. Dans un milieu homogène et isotrope à 2 ou à 3 dimensions, *la célérité c est la même dans toutes les directions*. La célérité c *dépend de la nature et de l'état du milieu de propagation*. Les ondes transversales et longitudinales peuvent avoir des vitesses différentes.

➤ 16.4 Grandeurs fondamentales caractérisant une onde (non nécessairement sinusoïdale)

Une *onde* est un *phénomène physique se propageant* et qui *se reproduit identique à lui-même un peu plus tard dans le temps et un peu plus loin dans l'espace*. Ce phénomène est donc caractérisé par une *double périodicité*.

La *période (T)* est l'*intervalle de temps* nécessaire pour effectuer une *oscillation complète*. Elle mesure donc la *périodicité temporelle du phénomène*. Elle se mesure en *secondes (s)* et correspond à l'inverse de la *fréquence f* :

$$T = \frac{1}{f}$$

La *fréquence (f ou ν)* d'une vibration correspond au *nombre d'oscillations par seconde*. Cette grandeur s'exprime en *Hertz (Hz)*.

La *longueur d'onde* (communément notée par la lettre grecque *lambda, λ*) est la *distance parcourue par l'onde pendant une période* ; elle mesure la *périodicité du phénomène dans l'espace*. Elle se mesure en *mètres (m)*.

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f}$$

On peut aussi définir la *longueur d'onde* comme étant la *plus courte distance séparant deux points du milieu dans des états vibratoires strictement identiques à un instant donné*.

➤ 16.5 Ondes acoustiques

Le son est une *vibration acoustique* qui se transmet depuis une *source*, jusqu'à un *récepteur* (l'oreille ou un micro) engendrant ainsi une *sensation auditive* ou un *signal sonore électrique*.

Dans l'air, milieu gazeux caractérisé par une pression voisine de la *pression atmosphérique normale* ($p_{\text{atm}} = 101\,325 \text{ Pa}$) et une vitesse des particules d'air nulle, le son se transmet sous la forme d'une *oscillation longitudinale des particules* du milieu autour de leur position d'équilibre ; cette oscillation provoque une *oscillation longitudinale de pression périodique* autour de la valeur normale, engendrant une *suite d'états de compression ou de dépression* des « particules » du milieu, causés par le passage de la perturbation acoustique. La valeur de cette variation de pression est appelée *pression acoustique*. Les *pressions acoustiques audibles* sont comprises entre $20 \mu\text{Pa}$ (*seuil d'audibilité*) et 20 Pa aujourd'hui (*seuil de douleur*).

La *fréquence* d'un son pur (ou de l'harmonique fondamentale d'un son composé) est associée à la *sensation de hauteur* que notre oreille attribue au son.

L'*amplitude* d'un son pur est associée à la *sensation de force* que notre oreille attribue au son.

L'*intensité acoustique instantanée* $I(x,t)$ (en W/m^2) d'un son est la *puissance acoustique instantanée qui traverse une unité de surface du front d'onde* (un front d'onde étant le lieu des points de l'espace qui sont tous dans le même état vibratoire). La *valeur minimale* de l'intensité acoustique à laquelle l'oreille est sensible à la fréquence de 1000 Hz est de l'ordre de $10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Le *seuil de douleur* correspond à une valeur d'environ $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

L'utilisation des unités d'intensité acoustiques (W/m^2) ou de pression acoustique (Pa) n'est pas très pratique en raison de l'*étendue énorme de la plage couverte*. Pour *comprimer ces échelles*, on utilise en général les *logarithmes*. Cet usage se justifie aussi par le fait que la *loi de Weber-Fechner* montre que *la sensation auditive croît logarithmiquement vis-à-vis de l'intensité acoustique*.

Le *niveau d'intensité acoustique* L_I , exprimé en *décibels absolus*, d'un son d'intensité I est défini par :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Si plusieurs sons se superposent, on ne peut pas obtenir le niveau global en additionnant les valeurs de chaque niveau pris séparément.

Chapitre 3 : notions d'électricité, de magnétisme et d'électromagnétisme

Première partie : notions élémentaires d'électricité

1 Introduction

➤ 1.1 Définition

L'électricité est une *branche de la physique* étudiant l'effet du déplacement de *particules chargées*, à l'intérieur d'un « *conducteur* », sous l'effet d'une *différence de potentiel* aux extrémités de ce conducteur.

➤ 1.2 Les charges positives et négatives

Les objets peuvent posséder une propriété connue sous le nom de *charge électrique*. En présence d'autres charges, un tel objet chargé subit une *force (attractive ou répulsive)*.

Il existe deux types de charges électriques : positive et négative.

Les objets ayant des charges de mêmes signes se repoussent mutuellement.

Les objets ayant des charges de signes contraires s'attirent mutuellement.

L'unité usuelle de mesure de la charge est le *coulomb (C)*. Toutefois dans certains contextes, d'autres unités comme l'*ampère-Heure (A.h)*, avec $1 \text{ A.h} = 3600 \text{ C}$ sont parfois utilisées

2 Force de Coulomb entre particules chargées

Loi de Coulomb (Force électrique entre des charges ponctuelles)

1) Grandeur de la force

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

où $k = 8,98755 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

2) Direction de la force

Les charges de mêmes signes se repoussent mutuellement
Les charges de signes contraires s'attirent mutuellement

3) Point d'application de la force

Pour une charge ponctuelle : sur la charge

3 Le champ électrique

➤ 3.1 Définition

Un champ électrique est une *région de l'espace où s'exerce une force sur une charge d'essai électrique*. On note E l'intensité de ce champ défini par la *force par unité de charge*.

Le champ se mesure en N/C. On remarque aussi que le champ électrique doit être un *vecteur* puisque la force est un vecteur.

➤ 3.2 Les lignes de champ électrique

On peut représenter le champ par des lignes de champ. On trace ces lignes pour que le champ électrique soit toujours tangent aux lignes.

Par convention, elles partent d'objets chargés positivement et aboutissent aux objets chargés négativement.

4 La nature de l'électricité

➤ 4.1 Théorie du(des) fluide(s)

Au départ, on pense que l'électricité est un *fluide invisible, sans masse*. Quand un objet est chargé, c'est qu'il contient une certaine quantité de fluide électrique.

➤ 4.2 Théorie corpusculaire

À la théorie du fluide s'opposait la *théorie corpusculaire de l'électricité*. Dans cette théorie, il y a des *particules d'électricité qui peuvent être ajoutées aux objets*. En 1891, George Johnson Stoney nomma ces particules *électrons*.

➤ 4.3 Découverte de l'électron et de ses caractéristiques

Thomson montre que les *rayons cathodiques* (observés lors d'une décharge électrique dans un gaz raréfié) sont constitués de *particules chargées négativement*. C'est un *constituant fondamental* de la matière dont il détermine le rapport m/e . Cette valeur est environ *2000 fois plus petite que la plus petite valeur mesurée jusqu'à ce jour*, qui était le rapport entre la masse et la charge d'ions hydrogène.

Cette observation suggère donc :

Si la charge d'une particule d'un rayon cathodique est comparable à celle d'un ion H^+ , alors la masse d'une particule du rayon cathodique est beaucoup plus petite que celle d'un ion H^+ ;

Si la masse d'une particule d'un rayon cathodique est comparable à celle d'un ion H^+ , alors la charge d'une particule du rayon cathodique est beaucoup plus grande que celle d'un ion H^+ .

Thomson pensait pouvoir prouver la première hypothèse, mais n'a jamais pu mesurer précisément la masse ou la charge des particules.

Il fallut attendre 1909 pour que *Robert Andrews Millikan mesure séparément la masse et la charge des électrons*.

À l'aide de l'expérience de la gouttelette d'huile, Millikan a pu déterminer la charge de l'électron, qui est de $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ coulomb.

Avec la valeur de la charge de l'électron ($e = -1,602 \times 10^{-19}$ coulomb), Millikan a également pu déterminer la *masse de l'électron* à l'aide des résultats de l'expérience de Thompson.

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

➤ 4.4 Autres particules chargées

En 1914, Lord Rutherford découvrait le *proton* qui a une charge identique à celle de l'électron, mais positive. Ce sont les deux seules particules chargées dans la matière qui nous entoure.

En fait, il existe de nombreuses autres particules chargées, mais aucune n'est présente naturellement dans la matière qui nous entoure.

5 Retour sur la notion de charge électrique

➤ 5.1 Charge élémentaire

Le nombre $1,602 \times 10^{-19}$ C revient souvent en électricité. On le représente donc par le symbole e , appelé la *charge élémentaire*.

➤ 5.2 La quantification de la charge

Quand on charge un objet, on ajoute ou on enlève des protons ou des électrons. Comme il est impossible d'ajouter ou d'enlever une fraction de proton ou d'électron, *la charge de l'objet doit être un multiple entier de la charge élémentaire e* . C'est la *quantification de la charge*

➤ 5.3 La conservation de la charge

La charge totale d'un système isolé reste toujours constante.

➤ 5.4 La séparation de la charge

Les *électrons* dans une substance ne sont pas tous liés de la même façon. Certaines substances perdent des électrons assez facilement alors que d'autres auront tendance à voler des électrons à d'autres substances. Ainsi, quand on met en contact deux objets, il est possible qu'il y ait un *transfert d'électrons d'une substance à l'autre*.

6 Notion de potentiel électrique et de différence de potentiel

➤ 6.1 Introduction et définition rigoureuse

Le *potentiel électrique* V (ou plus simplement potentiel) en un point d'un champ électrique correspond donc au *travail à fournir pour transporter une charge positive unitaire depuis l'infini jusqu'à ce point* (le potentiel électrique à l'infini étant par définition égal à zéro).

La *différence de potentiel électrique* (ΔV) est le travail effectué par unité de charge quand un objet chargé se déplace entre deux points dans un champ électrique.

- 6.2 Caractère conservatif de la force de Coulomb
- 6.3 Expression de l'énergie potentielle de deux charges en interaction
- 6.4 Deux analogies pour comprendre la notion de potentiel

Le *potentiel électrique* et la *différence de potentiel* peuvent être compris par *analogie avec un cours d'eau* observé dans une rivière ; le *potentiel* de chaque point est son *altitude* alors que la *différence d'altitude* correspond à la *différence de potentiel*.

Si on compare le courant électrique au courant d'une rivière, le *potentiel d'un point* correspond à l'*altitude* d'un endroit de la rivière : le courant de la rivière descend la pente, le courant électrique descend les potentiels.

De la même façon, les *charges positives* cherchent à aller vers les endroits où le *potentiel* est le *plus bas*, exactement comme les *masses* cherchent à descendre vers la *plus basse altitude* sous l'effet de la gravitation.

On peut aussi faire l'analogie suivante avec la thermodynamique : les *charges positives* cherchent à aller vers les endroits où le *potentiel* est le *plus bas*, exactement comme la *chaleur* cherche à aller vers les endroits où la *température* est basse.

- 6.5 L'énergie électrique et le potentiel dans un champ uniforme

7 Notion de source ou générateur électrique

Une *source* ou *générateur électrique* est un *dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie*. Par opposition, un appareil qui consomme de l'énergie électrique s'appelle un *récepteur électrique*.

Plus précisément, on appelle *générateur* tout *dispositif capable de créer un courant permanent dans un conducteur*. Pour cela il doit être capable de *maintenir une différence de potentiel entre ses bornes A et B*. Les bornes d'un générateur sont appelées *pôles*. La borne de *potentiel le plus élevé* est le *pôle positif*, et la borne de *potentiel le moins élevé* le *pôle négatif*.

La source ne fait que *transporter des charges pour maintenir la différence de potentiel entre deux conducteurs*.

Une bonne analogie consiste à *comparer un générateur de tension à une pompe qui crée une différence de pression entre deux points*.

8 Les isolants et les conducteurs

Les charges peuvent se déplacer dans les substances conductrices alors qu'elles sont immobiles dans les substances isolantes. Nous définirons plus tard le courant comme un transfert de charge. Un conducteur est donc une matière à travers laquelle le courant électrique peut circuler. On dit qu'une telle matière conduit le courant électrique. Un isolant est l'opposé d'un conducteur : c'est une matière à travers laquelle le courant électrique ne peut circuler.

9 Le courant électrique

➤ 9.1 Découverte des conducteurs et des isolants

Les charges peuvent se déplacer dans certains matériaux que l'on appelle dès lors conducteurs. On appelle courant électrique un tel déplacement de charges.

➤ 9.2 Notion de courant électrique

On appelle courant électrique une circulation de charges électriques.

➤ 9.3 Porteurs de charges

Ces charges peuvent être des électrons dans un solide conducteur (cuivre, aluminium, etc.) ou dans un liquide conducteur (mercure à la température de 20°C) ou encore dans le vide (tube électronique ou tube cathodique d'écran de télévision), des trous (mais on se ramène à des électrons, voir cours d'électronique), des ions dans une solution (2H⁺ SO₄²⁻), par exemple dans l'électrolyte d'un accumulateur au plomb.

➤ 9.4 Cause d'un courant électrique

Le courant électrique circule en général entre deux points parce que les charges mobiles sont soumises à une différence de potentiel électrique (d.d.p. exprimée en Volts) entre ces deux points.

➤ 9.5 Définition de l'intensité du courant électrique

Quand des charges se déplacent, il y a un courant. Plus il y a de charges qui se déplacent par unité de temps, plus le courant est grand. On peut donc définir ainsi l'intensité du courant comme la charge qui passe en un point par unité de temps. Les unités de ce courant sont des C/s. On a donné le nom d'ampère à cette unité.

➤ 9.6 Le sens du courant

Le sens du courant est toujours celui du mouvement des charges positives.

10 Notion de résistance

➤ 10.1 Définition de la résistance

On remarque que *certaines matériaux laissent plus facilement passer les charges que d'autres*. On dit alors que ces matériaux sont plus *résistants*. La *résistance électrique* traduit la propriété d'un composant à s'opposer au passage d'un courant électrique.

➤ 10.2 Conductance

11 La puissance électrique d'un récepteur

La *puissance électrique d'un générateur ou d'un récepteur* est l'énergie électrique échangée entre les charges électriques et le générateur / le récepteur par unité de temps.

$$P = U \times I$$

En watt (W) En Volt (V) En Ampère (A)

12 Effet Joule

➤ 12.1 Description de l'effet Joule

Il est impossible que le potentiel monte quand le courant passe à travers une résistance. La résistance reçoit donc toujours de l'énergie. Dans ce cas, l'énergie électrique est dissipée en chaleur. Cette dissipation de chaleur par une résistance s'appelle l'effet Joule.

➤ 12.2 Une application de l'effet Joule : les fusibles

13 Le condensateur

➤ 13.1 Définition

Un *condensateur* est simplement formé de *deux armatures conductrices ayant des charges opposées*, séparées par du vide ou un isolant. Puisqu'il y a un *champ électrique* entre les deux armatures, cela veut dire qu'il y a une *différence de potentiel* entre les armatures. Le lien entre la charge des armatures et la différence de potentiel entre les armatures est la *capacité* du condensateur, notée C. Les unités de la capacité sont des C/V. On a donné le nom de *farad* à cette unité.

➤ 13.2 Énergie dans un condensateur

Deuxième partie : notions élémentaires de magnétisme

14 Introduction

➤ 14.1 Définition

Le *magnétisme* représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux.

➤ 14.2 La découverte de la force magnétique

Les Grecs savaient que *certaines pierres attiraient de petits morceaux de fer* et comme ces pierres venaient de *Magnésie* (aujourd'hui en Turquie), on parla de *magnétisme*. Ces

pierres sont en fait des *aimants naturels* et c'était la *seule manifestation du magnétisme connue avant 1820*.

➤ 14.3 Les aimants

Un *aimant* est un corps qui a la *propriété d'attirer les métaux ferreux* ; cette propriété porte le nom de *ferromagnétisme*. On trouve à *l'état naturel cinq éléments* qui possèdent cette propriété : le cobalt (Co), le dysprosium (Dy), le fer (Fe), le gadolinium (Gd) et le manganèse (Mn).

➤ 14.4 Magnétisme terrestre et boussole

On découvrit, fort probablement au IX^{ème} siècle en Chine, que *les aimants s'alignent dans la direction nord-sud*, ce qui mena directement à *l'invention de la boussole*.

15 La force magnétique

➤ 15.1 Notion de pôles

Conventionnellement, *le pôle qui est dirigé vers le Nord est appelé le pôle Nord de l'aimant*, le pôle qui est dirigé vers le Sud est appelé le pôle Sud de l'aimant.

➤ 15.2 Attraction et répulsion

Si l'on met bout à bout des aimants, on remarque que *les pôles de même nature se repoussent* alors que *les pôles de natures différentes s'attirent*

16 Le champ magnétique

➤ 16.1 Définition

Comme en électricité, on va utiliser le concept de *champ*. On part de l'idée simple que si un pôle magnétique subit une force quand il est à un endroit, alors il y a un champ magnétique à cet endroit. *On va noter ce champ B*.

➤ 16.2 Action d'un champ magnétique sur une aiguille aimantée

Le *champ magnétique* d'un aimant exerce sur une aiguille aimantée un *moment de force*. Si l'aiguille est *en rotation libre*, elle tourne jusqu'à une *position d'équilibre*, dans laquelle ce *moment est nul*.

➤ 16.3 Lignes de champ magnétique

On va aussi utiliser les *lignes de champ* pour *représenter le champ magnétique*. Le *champ* est toujours *tangent* à la ligne de champ, dans la direction de la ligne. Plus les *lignes de champ s'approchent* les unes des autres, plus le *champ est fort*. *Les lignes de champ ne se croisent pas*

17 Le magnétisme terrestre : petit historique

➤ 17.1 Les précurseurs

➤ 17.2 La déclinaison magnétique

L'*angle D* (ou δ) que fait le *méridien magnétique* avec le *méridien géographique* est appelé *déclinaison magnétique* du lieu considéré.

Elle est dite *occidentale (ou négative)* ou *orientale (ou positive)* suivant que le méridien magnétique est à l'ouest ou à l'est du méridien géographique.

➤ 17.3 Gilbert : la Terre est un aimant

➤ 17.4 L'inclinaison magnétique

L'inclinaison magnétique d'un lieu est l'angle I que fait le vecteur champ magnétique B avec l'horizontale. Elle est positive quand le pôle nord de l'aiguille aimantée pointe vers le sol, c'est le cas dans l'hémisphère Nord, elle est négative dans le cas contraire.

18 Il n'y a pas de monopôles magnétiques

On découvrit aussi qu'on ne pouvait obtenir de monopôle magnétique, c'est-à-dire un aimant avec uniquement un pôle nord ou uniquement un pôle sud. Les deux pôles sont toujours présents sur un aimant, ce qui veut dire qu'on a toujours un dipôle magnétique.

Troisième partie : notions élémentaires d'électromagnétisme

19 Lien entre force électrique et force magnétique

➤ 19.1 Un aimant n'a aucun effet sur l'électricité statique

Si une charge électrique immobile est à proximité d'un aimant, il ne se passe absolument rien.

➤ 19.2 Les courants dévient les boussoles

Il faut attendre 1820 pour que Hans Christian Ørsted découvre ce lien : quand le courant passe au-dessus d'une boussole comme sur la figure, elle change de direction.

➤ 19.3 Le champ magnétique d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant

➤ 19.4 La force magnétique sur un courant

Selon la troisième loi de Newton, si les courants exercent une force sur les pôles magnétiques, cela veut dire que les pôles exercent une force sur les courants. Un aimant peut donc exercer une force sur un fil parcouru par un courant.

➤ 19.5 La force magnétique sur une charge en mouvement

Comme les courants sont en fait des charges en mouvement, cela signifie que les aimants peuvent exercer une force sur une charge en mouvement, donc que les charges électriques en mouvement dans un champ magnétique subissent une force.

20 Induction magnétique

➤ 20.1 La découverte de l'induction magnétique

On savait depuis la découverte d'Ørsted en 1820 qu'un courant crée un champ magnétique. On pensa donc qu'on pouvait aussi faire l'inverse : obtenir un courant à partir d'un champ magnétique.

Pendant 10 ans, on ne parvient pas à obtenir un courant dans un fil avec un champ magnétique. Finalement, en 1830, Joseph Henry et Michael Faraday découvrent indépendamment comment on peut obtenir un courant dans une boucle de fil. Ce qu'on obtient en fait est une différence de potentiel entre les deux extrémités du fil formant la boucle. Cette différence de potentiel fera un courant si la boucle de fil se referme sur elle-même pour faire un circuit. On aura alors un courant induit.

Par exemple, on obtient une différence de potentiel induite en approchant ou en éloignant un aimant d'une boucle de fil :

- *Il y a une différence de potentiel induite uniquement si l'aimant et la bobine s'approchent ou s'éloignent l'un de l'autre. On peut déplacer l'aimant pour le faire, mais on pourrait aussi déplacer la bobine de fil tout en laissant l'aimant à la même place.*
- *Plus on déplace l'aimant rapidement, plus la différence de potentiel induite est importante.*
- *Quand on approche l'aimant avec le pôle nord en premier, il y a un courant dans un sens. Si on éloigne l'aimant, le courant dans la bobine est dans l'autre sens.*

➤ 20.2 Le flux magnétique

Le flux d'induction magnétique Φ qui traverse une surface S est égal au nombre de lignes de forces du champ d'induction magnétique B qui pénètre la surface S . Son unité d'expression dans le système international d'unités est le Weber.

➤ 20.3 La différence de potentiel induite dépend du taux de variation du flux

➤ 20.4 La loi d'induction de Faraday

21 Maxwell et l'électromagnétisme

Le phénomène d'induction est la pierre angulaire d'un édifice théorique imposant, l'*électromagnétisme*, décrit aujourd'hui par les *équations de Maxwell*.

➤ 21.1 Boucle de courant dans un champ uniforme et moteur électrique

Un moteur électrique est une simple boucle dans un champ magnétique. On fait passer un courant dans la boucle, ce qui fait tourner la boucle pour que le moment dipolaire magnétique μ s'aligne avec le champ. C'est alors qu'on va changer le sens du courant dans la boucle. Cela inverse la direction de μ , et il n'est plus aligné avec le champ. La boucle doit donc faire un autre demi-tour pour réaligner μ avec B .

➤ 21.2 Générateur électrique

Dès la découverte de l'induction, Faraday tente de fabriquer un générateur, c'est-à-dire un appareil qui va fournir une différence de potentiel. Après quelques essais, la solution retenue fut de faire tourner une boucle de fil dans un champ magnétique. La différence de potentiel varie donc de façon sinusoïdale. On obtient ce qu'on appelle une différence de potentiel alternative. Si on branche cette source à un circuit, il y aura un courant qui variera aussi de façon sinusoïdale qu'on appelle un courant alternatif, noté AC (pour alternative current).

➤ 21.3 Les transformateurs

Un *transformateur* est un appareil qui permet de *changer l'amplitude de la différence de potentiel*. C'est simplement *par induction* que ce changement se fait. Le transformateur est formé simplement de deux bobines reliées par un cadre métallique. Il va y avoir une *différence de potentiel aux bornes d'une bobine* (appelé bobine primaire ou enroulement *primaire*). On verra alors apparaître, *par induction électromagnétique*, une *autre différence de potentiel aux bornes de l'autre bobine* (appelé bobine secondaire ou enroulement *secondaire*).

- 21.4 L'inductance et l'énergie magnétique d'un circuit

22 La lumière et les ondes électromagnétiques

- 22.1 Preuves expérimentale et théorique de la nature ondulatoire de la lumière
L'histoire de la découverte de la nature de la lumière est longue et passionnante. Les tenants d'une nature corpusculaire ou d'une nature ondulatoire se sont affrontés pendant des siècles.

À la fin du XIX^{ème}, la nature ondulatoire tend à s'imposer, ; qui plus est une « *expérience cruciale* » vient bientôt *départager les théories concurrentes*, la *mesure directe de la vitesse de la lumière dans différents milieux*.

En adoptant une *hypothèse corpusculaire*, il faut conclure que la *lumière se propage plus vite dans l'eau que dans l'air* (cf. Alhazen, Descartes, Hooke, Newton). D'après une *théorie ondulatoire*, ces résultats sont *inversés* (cf. Fermat, Huygens).

L'expérience cruciale réalisée par *Léon Foucault* (1819-1868) à l'aide d'un *miroir tournant*, en 1850 permet de confirmer l'hypothèse émise en 1838 par François Arago : *la vitesse de la lumière, plus faible dans l'eau, assure le triomphe de la théorie des ondulations*.

En l'absence de courants et de charges, on obtient en combinant les équations de Maxwell des équations du type de l'équation générale des ondes dont la solution consiste en la propagation d'une combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique transverses et perpendiculaires entre eux : les ondes électromagnétiques.

La célérité des ondes électromagnétiques est calculable dans la théorie de Maxwell et est très proche de la valeur expérimentale obtenue pour la vitesse de la lumière dans le vide.

La lumière, de nature vibratoire, devient donc un cas particulier des vibrations électromagnétiques.

Les grandeurs qui oscillent sont un champ électrique et un champ magnétique transverses, et constamment perpendiculaires entre eux.

➤ 22.2 Aspect ondulatoire de la lumière

La *lumière* désigne les *ondes électromagnétiques* visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde de 0,38 à 0,78 micron (380 nm à 780 nm , le symbole nm désignant le *nanomètre*, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$).

Comme toutes les ondes, les ondes électromagnétiques possèdent une *double périodicité* : la périodicité du phénomène dans l'*espace* est mesurée par la *longueur d'onde* λ (en m), tandis que la périodicité dans le *temps* est mesurée par la *période* T (en s) ou son inverse, la *fréquence* ν (en Hz).

On a entre ces grandeurs la relation fondamentale :

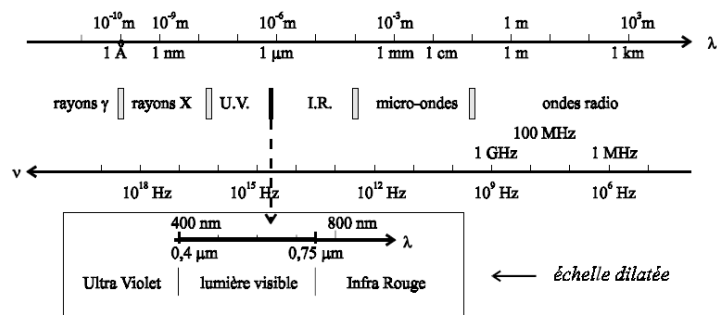
$$\lambda = c.T = \frac{c}{f}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide (ou *célérité*), égale à :

$$c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$$

➤ 22.3 Spectre électromagnétique

L'ensemble des fréquences possibles de rayonnement porte le nom de spectre électromagnétique. Il est en général divisé en sept régions plus ou moins distinctes. Les divisions entre les différentes plages de rayonnement reposent plutôt sur des circonstances historiques que sur des critères physiques, c'est pourquoi elles se chevauchent parfois. La lumière a évidemment été découverte la première, puis l'infrarouge (1800), l'ultraviolet (1801), les ondes radio (1888), les rayons X (1895), les rayons gamma (1900) et enfin les micro-ondes, qui sont venues s'insérer dans l'espace compris entre les ondes radio et l'infrarouge.



➤ 22.4 Histoire de la découverte du spectre électromagnétique

Chapitre 4 : la matière et l'énergie, révolutions du XXème siècle

1 Introduction

➤ 1.1 Structure interne de l'atome

Malgré son nom, l'*atome* n'est cependant *plus considéré comme un grain de matière insécable*, depuis les expériences de physique nucléaire ayant mis à jour sa structure au début du XX^e siècle.

Notre connaissance de la structure des atomes est très récente. En effet, la structure des atomes était totalement inconnue en 1895 !

➤ 1.2 Quantification de l'énergie

Le début du XXème siècle connaît aussi quelques révolutions importantes en matière de conception de l'énergie.

Certains processus physiques ne sont pas continus et ne peuvent produire que des quantités spécifiques d'énergie baptisées *quanta d'énergie*.

➤ 1.3 L'équivalence masse-énergie

Einstein établit l'*équivalence selon laquelle la matière se transforme en énergie et vice-versa*.

➤ 1.4 Dualité onde-corpuscule pour la lumière

La lumière est pour nous aujourd'hui une forme particulière d'*énergie*. Elle se manifeste tantôt comme une *onde* (aspect ondulatoire), tantôt sous la forme d'un flot de *particules* élémentaires appelées *quanta* ou encore *photons* (aspect corpusculaire). On parle du *principe de dualité onde-corpuscule*.

➤ 1.5 Dualité onde-corpuscule pour la matière

2 Chronologie et description succincte des découvertes

➤ 2.1 Rappel : découverte des rayons X par Roentgen

➤ 2.2 Découverte de la radioactivité par Becquerel

➤ 2.3 Rappel : découverte de l'électron par Thomson

➤ 2.4 Naissance officielle de la radioactivité avec Pierre et Marie Curie

➤ 2.5 Rappel : découverte des rayons gamma

➤ 2.6 Découvertes des propriétés des rayonnements radioactifs

➤ 2.7 L'équivalence masse-énergie

L'avènement de la *Relativité restreinte* a apporté une *surprise dans la définition de l'énergie*.

En effet, *en théorie non relativiste, l'énergie, même d'une particule libre, n'est définie « qu'à une constante arbitraire près »*.

Il n'en va pas de même dans une approche relativiste, on trouve en fait l'expression unique :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cong mc^2 + \frac{mv^2}{2} + \dots$$

Dans cette équation, c représente la vitesse de la lumière dans le vide, et le membre de droite est une approximation valable dans la limite où les vitesses v sont nettement inférieures à la vitesse de la lumière. On retrouve bien l'expression familière de l'énergie cinétique, mais on constate aussi que la constante est maintenant fixée de manière unique et qu'elle dépend de la masse de la particule.

L'histoire de ce terme est bien connue, puisqu'elle est à l'origine des développements de la physique nucléaire d'abord, de la physique des particules ensuite.

Il montre que la masse des particules fait partie du bilan d'énergie, mais on en déduit aussi que cette énergie peut être libérée par désintégration de la particule.

A l'inverse, la concentration d'une quantité d'énergie suffisante dans un très petit volume peut créer des particules plus lourdes.

Selon Einstein, un système de masse m possède donc, lorsqu'il est au repos, une énergie :

$$E = m \cdot c^2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E: \text{énergie du système en joules (J)} \\ m: \text{masse du système en kilogrammes (kg)} \\ c: \text{vitesse de la lumière dans le vide (} c=3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{)} \end{cases}$$

Mais cette équivalence n'explique pas ce que représente fondamentalement la masse et ce qui différencie la matière des rayonnements.

Cette équation établit l'équivalence selon laquelle la matière se transforme en énergie et vice-versa.

Ces transformations de matière en énergie trouvent notamment leur application dans la production d'énergie nucléaire par fission ou fusion de noyaux. Ces processus sont à l'œuvre depuis l'origine de l'univers dans les étoiles.

➤ 2.8 Nature et mesure des rayonnements radioactifs

Les rayonnements émis sont de trois types selon leur degré de pénétration et leur charge électrique : alpha, bêta et gamma.

Ernest Rutherford identifie le rayonnement alpha à des noyaux d'hélium et les rayons bêta à des électrons.

➤ 2.9 Rutherford et la découverte du noyau

En 1911, après une longue réflexion, *Rutherford* propose un nouveau modèle, dans lequel l'atome est constitué d'un noyau chargé positivement, autour duquel des électrons, chargés négativement, sont en mouvement et restent à l'intérieur d'une sphère. Le noyau est 10^4 à 10^5 fois plus petit que l'atome et concentre l'essentiel de sa masse. *L'atome est donc essentiellement constitué de vide.*

➤ 2.10 Rutherford et la découverte du proton

C'est encore Rutherford qui en 1919 met en évidence l'existence du proton en « démolissant » des noyaux d'azote.

Rutherford montra que des particules portant une charge positive, égale en valeur absolue à celle de l'électron, apparaissaient. De plus leur masse était pratiquement identique à celle de l'atome d'hydrogène.

➤ 2.11 Le modèle atomique de Rutherford

Rutherford propose un modèle atomique « système solaire » comprenant un noyau positif autour duquel gravitent un certain nombre d'électrons.

➤ 2.12 Prédiction de l'existence du neutron par Rutherford

➤ 2.13 Le modèle de Bohr de l'atome

➤ 2.14 La découverte du neutron

En 1932, le physicien britannique *James Chadwick* établit l'existence du neutron et montre que *le neutron est un partenaire neutre du proton dans le noyau.*

Le noyau est ainsi constitué d'un assemblage de protons (noyau de l'hydrogène) et de neutrons.

➤ 2.15 La radioactivité artificielle

➤ 2.16 Découverte de la fission nucléaire et de la possibilité d'une réaction en chaîne

3 L'atome, avant la mécanique quantique

➤ 3.1 Généralités

Un atome est constitué d'un *noyau* concentrant plus de 99,9 % de sa masse, autour duquel se distribuent des *électrons* pour former un nuage 40 000 fois plus étendu que le noyau lui-même.

Le noyau est constitué de *protons*, chargés positivement, et de *neutrons*, électriquement neutres. Neutrons et protons portent le nom de *nucléons*.

Le *nombre de nucléons* est noté *A*, on l'appelle aussi le *nombre de masse*.

Le *nombre de protons* que contient le noyau est noté *Z*. On l'appelle le *numéro atomique* ou le *nombre de charges*.

La *taille de l'atome* est de l'ordre du *dixième de milliardième de millimètre* c'est-à-dire : $10^{-10} \text{ m} = 0,000\ 000\ 000\ 1 \text{ m}$.

Un *noyau d'atome* a une taille de l'ordre de 10^{-15} m, soit cent mille fois plus petit que l'atome lui-même.

La *masse d'un nucléon* (les protons et les neutrons ont quasiment la même masse) est de $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg, soit moins de deux millièmes de milliardième de milliardième de milligramme.

La masse d'un électron est de $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, soit environ 1840 fois moins qu'un nucléon.

Ainsi, 99,97 % de la masse d'un atome est dans son noyau.

Comme le noyau est très petit, la *masse d'un atome est donc très concentrée*.

➤ 3.2 Isotopes

Des noyaux possédant le *même nombre de protons mais des nombres différents de neutrons* sont appelés *isotopes* en physique nucléaire et en chimie

Le nombre de protons dans le noyau d'un atome étant désigné par le numéro atomique Z , *deux isotopes ont le même nombre Z* .

Ce qui distingue deux isotopes est qu'ils ont un *nombre de masse A différent*.

➤ 3.3 Unité de masse atomique

On définit l'*unité de masse atomique (uma., ou Dalton Da)* (masse atomique relative) comme étant *1/12 de la masse atomique de l'isotope ^{12}C du carbone* ce qui représente $1,66057 \cdot 10^{-27}$ kg.

➤ 3.4 La masse atomique est une moyenne pondérée

4 Des problèmes à la naissance de la physique moderne

➤ 4.1 Problème de l'instabilité de l'atome

➤ 4.2 Deux petits nuages...

5 Le problème de l'éther, à la base de la relativité d'Einstein

L'éther luminifère est superflu.

La vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels inertiels.

6 La catastrophe ultraviolette à la base de la mécanique quantique

➤ 6.1 Introduction

La *catastrophe ultraviolette*, formulée dans la seconde moitié du XIX^e siècle et ainsi nommée par le physicien autrichien Paul Ehrenfest, est une *prédiction contre-factuelle* (c'est-à-dire contredite par l'observation) des *théories classiques de la physique* — électromagnétisme et physique statistique : *un corps chauffé, à l'équilibre thermodynamique est censé rayonner un flux infini.*

➤ 6.2 La théorie du corps noir, introduction

La théorie du corps noir est l'un des plus vieux problèmes de la physique théorique et il est à l'origine de la physique quantique.

Elle vise à répondre notamment à deux questions simples :

- Pourquoi lorsqu'on chauffe un objet, celui-ci émet-il de la lumière ?
- Pourquoi la couleur de la lumière émise change-t-elle avec la température ?

➤ 6.3 Le rayonnement du corps noir : explication classique

Du point de vue classique, le rayonnement thermique résulte de l'accélération des particules chargées situées près de la surface du corps chauffé ; *ces particules en oscillant émettent un rayonnement, tout comme une antenne.*

Vers la fin du XIX^{ème} siècle, il devenait évident que l'explication classique du rayonnement thermique n'était *pas satisfaisante*, le problème fondamental consistait en effet à *expliquer la distribution spectrale du rayonnement émis par un corps noir.*

➤ 6.4 Loi du rayonnement de Wien

➤ 6.5 La loi de Rayleigh-Jeans

➤ 6.6 Le rayonnement du corps noir et la revanche des « corpusculistes »

Par un *renversement inattendu de l'histoire*, la résolution du problème posé par la « catastrophe ultraviolette », ainsi que la *présence de discontinuités dans le rayonnement* émis par le *corps noir* devait renouveler, au début du XX^{ème} siècle, *une hypothèse favorable à des agglomérats énergétiques* dans le rayonnement émis (*aspect corpusculaire de la lumière*).

➤ 6.7 L'idée géniale de Max Planck

Le physicien allemand *Max Planck* (1858-1947) introduit comme hypothèse la *quantification des échanges d'énergie entre la lumière et la matière* et fait apparaître une *nouvelle constante fondamentale* en physique (la *constante de Planck*).

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

➤ 6.8 Physique classique vs physique quantique

Einstein, en 1906, postule que *chaque oscillateur possède une énergie quantifiée* : nh où n est le niveau d'énergie. Il parle ici de quantité quantifiée, et non plus seulement d'un artifice mathématique.

C'est la naissance du *photon* et le début de la quantification de l'énergie...mais tous n'y croient pas.

➤ 6.9 La loi de Planck du rayonnement du corps noir

➤ 6.10 Illustration : le Soleil est un corps noir

➤ 6.11 Le rayonnement fossile, preuve décisive de la théorie du Big Bang

7 L'effet photoélectrique

➤ 7.1 Définition

On appelle *effet photoélectrique externe* l'extraction d'électrons de la matière sous l'effet de la lumière.

➤ 7.2 Brève histoire de la découverte de l'effet photoélectrique

➤ 7.3 Lenard découvre les lois de l'effet photoélectrique

➤ 7.4 Tentative d'explication : échec de la théorie électromagnétique

➤ 7.5 Succès de la théorie d'Einstein

Lors de l'émission et de l'absorption d'un rayonnement de fréquence ν par la matière, l'énergie lumineuse n'est pas répartie uniformément sur le front d'onde, mais bien concentrée en une série de « *grains d'énergie* » séparés par du vide. Ces « *grains* », ou *quanta*, de lumière sont appelés *photons*.

Contrairement à Planck, qui ne faisait porter la *quantification* que sur les *échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière*, Einstein donne une *structure discrète (corpusculaire)* à la lumière elle-même.

➤ 7.6 Vérification expérimentale de la théorie d'Einstein

En 1916, R. Millikan publie une étude très détaillée de l'émission photoélectrique, qui établit que *la constante h dans l'équation d'Einstein est bien égale à la constante de Planck introduite pour l'étude du corps noir* (la valeur obtenue expérimentalement était $h = 6.56 \pm 0.04 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).

8 La dualité onde-corpuscule et les débuts de la mécanique quantique

➤ 8.1 La double nature de la lumière

La lumière est pour nous aujourd'hui une forme particulière d'énergie. Elle se manifeste tantôt comme une *onde* (aspect ondulatoire), tantôt sous la forme d'un flot de *particules* élémentaires appelées *quanta* ou encore *photons* (aspect corpusculaire). On parle du *principe de dualité onde-corpuscule*.

➤ 8.2 Ondes versus particules

➤ 8.3 Aspect corpusculaire de la lumière

• 8.3.1 Energie du photon

À une *onde électromagnétique* harmonique de fréquence f donnée correspondent des *photons* d'énergie E fixée par la *relation de de Broglie* :

$$E = h.f$$

où h est une constante fondamentale de la physique, appelée *constante de Planck*. Elle a les mêmes unités qu'un moment angulaire (Joule.seconde). Elle vaut :

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

- 8.3.2 Quantité de mouvement du photon

La *quantité de mouvement du photon* vaut :


$$p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot f}{c}$$

- 8.4 Double nature de la matière

L'*hypothèse de de Broglie* (formulée en 1924) est l'affirmation que *toute matière est dotée d'une onde associée* : ceci donne lieu à la *dualité onde-particule*. De plus, la longueur d'onde λ et la quantité de mouvement p d'une particule sont reliées par une équation simple : $\lambda = h.p$, avec h la constante de Planck, posant ainsi les bases de la mécanique quantique.

- 8.5 Le spectre de l'atome d'hydrogène, à la base du modèle atomique de Bohr

Le modèle de Bohr



Pour concilier le modèle planétaire et le spectre de H, **Niels Bohr** publie en 1915 un article intitulé *de la constitution des atomes et des molécules*, dans lequel il émet 3 postulats :

1. *L'électron circule à vitesse et énergie constante sur des orbites circulaires particulières pour lesquelles il y a exacte compensation entre l'attraction coulombienne du noyau et la force centrifuge.*

2. *Ces orbites particulières se limitent à celles pour lesquelles le produit de la quantité de mouvement par la longueur de l'orbite est un multiple entier de la constante de Planck h .*

3. *Le changement d'orbite se produit par absorption ou émission d'un photon. L'énergie du photon absorbé ou émis correspond à la différence d'énergie des deux orbites.*

Le modèle de Bohr *redonne la formule de Balmer* et explique donc le spectre de l'atome d'hydrogène, *mais* repose sur des hypothèses *ad hoc*, et *n'explique pas vraiment l'origine de la quantification*.

9 Principes généraux de la mécanique quantique

- 9.1 Avènement de la mécanique quantique
- 9.2 Relation d'incertitude position-vitesse de Heisenberg

Le concept même de trajectoire n'est plus valable à l'échelle des particules élémentaires.

Il faut plutôt parler de la *probabilité* de trouver une particule, comme un électron, en un endroit précis.

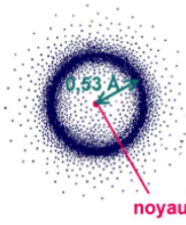
En particulier, on ne peut pas connaître simultanément avec une précision arbitraire la position et la vitesse d'une particule dans une direction donnée.

- 9.3 L'énergie du vide et la mécanique quantique
L'état d'énergie le plus bas d'un système quantique est communément appelé « vide ». Il résulte des relations d'incertitude que ce vide, état d'énergie minimum, comporte quand même une certaine densité d'énergie.
- 9.4 Fonction d'onde associée à l'électron en mouvement
La fonction d'onde contient toute l'information relatives à l'électron en mouvement.
- 9.5 L'interprétation physique de la fonction d'onde : notion de probabilité de présence
La fonction d'onde permet de calculer la *probabilité de présence* de la particule en un point donné.
- 9.6 Équation de Schrödinger
C'est l'équation fondamentale de la mécanique quantique : elle permet de *déterminer la fonction d'onde* du système étudié.
- 9.7 Équation de Schrödinger stationnaire et quantification de l'énergie
Cette équation couplée à la condition de normalisation n'a de *solutions* que *pour certaines valeurs de l'énergie* (énergie quantifiée).
- 9.8 Relation d'incertitude temps-énergie

10 L'atome en mécanique quantique


- 10.1 Introduction
- 10.2 L'atome d'hydrogène : les orbitales électroniques
L'électron occupe une *orbitale atomique* en interaction avec le noyau *via la force électromagnétique*.

Le concept d'orbitale



Mécanique quantique

Orbitale
L'électron a une probabilité donnée de se trouver à une distance d du noyau. L'orbitale définit la région de l'espace dans laquelle cette probabilité est constante.



Mécanique classique

Orbite
L'électron se trouve à une distance d du noyau, il ne peut en aucun cas se trouver ailleurs.

De la résolution de l'équation de Schrödinger on peut tirer les orbitales atomiques, qui sont des portions de l'espace (volume) dans lesquels il y a une grande probabilité de

trouver l'électron. Chaque orbitale atomique est caractérisée par *trois nombres quantiques* ; un quatrième nombre quantique, associé au spin, ne concerne que l'électron.

➤ 10.3 Le spin, une propriété purement quantique

Le *spin* est une *propriété interne* des particules, au même titre que la masse ou la charge électrique. Comme d'autres observables quantiques, sa mesure donne des *valeurs discrètes* et est soumise au principe d'incertitude. C'est la seule observable quantique qui *ne présente pas d'équivalent classique*, contrairement, par exemple, à la position, l'impulsion ou l'énergie d'une particule.

Il est *toutefois souvent assimilé au moment cinétique de rotation* (comme si l'électron était animé d'un mouvement propre et tournait sur lui-même comme une toupie).

Ce « mouvement de rotation de l'électron sur lui-même » engendre un *moment magnétique* (une charge en rotation engendre un moment magnétique, or l'électron est une particule chargée). C'est ce moment magnétique que l'on nomme le SPIN. Le spin consiste donc en une *manifestation du magnétisme de la particule* mais d'une manifestation *proprement quantique* c'est-à-dire inexplicable en physique classique.

Pour un électron dans l'atome, le nombre quantique magnétique de spin noté m_s désigne l'orientation du spin et est quantifié : il prend les valeurs $+1/2$ ou $-1/2$ uniquement.

Ce moment magnétique constitue le *quatrième nombre quantique* de l'électron dans l'atome.

- 10.4 Description des orbitales de l'atome d'hydrogène
- 10.5 Atomes hydrogénoïdes (à un seul électron)
- 10.6 Atomes à plusieurs électrons
- 10.7 Structure du tableau périodique des éléments, configuration électronique des éléments
- 10.8 Principales familles chimiques
- 10.9 Les modèles atomiques, résumé
- 10.10 Peut-on « voir » et manipuler les atomes ?

En 1981, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer des laboratoires IBM inventèrent la *microscopie à effet tunnel*, invention pour laquelle ils reçurent le *prix Nobel de physique 1986*.

Le principe en est relativement simple — pour la réalisation, c'est autre chose : *une pointe nanométrique se déplace sur l'échantillon à observer*, permettant ainsi de *reconstituer le « paysage » atomique grâce aux informations recueillies par effet tunnel*.

Il s'agit, pour simplifier, d'un *palpeur* (une *pointe* ou *sonde*) qui *suit la surface de l'objet*. La *sonde balaie* (scanne) la surface à représenter. Un *ordinateur ajuste* (via un système d'asservissement) *en temps réel la hauteur de la pointe pour maintenir un courant*

constant (courant tunnel) et enregistre cette hauteur qui permet de reconstituer la surface.

11 Mécanique quantique relativiste

La mécanique quantique relativiste qui décrit la dynamique quantique d'une particule relativiste fait apparaître des énergies négatives.

- 11.1 Energie négative et antiparticules
- 11.2 Equation de Dirac
- 11.3 L'antimatière

L'association de la mécanique quantique et de la relativité restreinte conduit ainsi Dirac à postuler l'existence d'*antiparticules*, possédant exactement la même masse, mais des charges (par exemple électrique) opposées aux particules correspondantes.

Lorsqu'une particule de matière et son antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent complètement et se transforment en énergie suivant l'équation $E=mc^2$.

Ce phénomène est réversible : *de l'énergie peut être transformée en couple matière/antimatière.*

- 11.4 Masse et interactions

Chapitre 5 : le système international des unités (SI)

1 Sources principales

2 Physique et mesure

Classiquement, *mesurer une grandeur* consiste à la *comparer* à une *grandeur de même nature* choisie comme *unité*.

Dans le *système international d'unités (SI)*, successeur du *système métrique*, on rapporte *toutes les mesures* à un *très petit nombre d'étalons fondamentaux*, auxquels il est possible de consacrer tout le soin nécessaire.

Ceux-ci définissent directement les *unités de base* : *mètre, kilogramme, seconde, ampère, kelvin, candela, mole*.

Les *unités dérivées* s'en déduisent à l'aide de *relations de définition, relations physiques* entre les grandeurs de base et les grandeurs dérivées.

3 Genèse du Système International des unités (SI)

- 3.1 Préhistoire du système métrique (d'après Bigourdan, Le système métrique des poids et des mesures)
- 3.2 Histoire du système international

4 Les deux classes d'unités SI

On distingue *deux classes d'unités SI* :

- les *unités de base* ;
- les *unités dérivées*.

Du point de vue scientifique, la division des unités SI en ces deux classes est *arbitraire* car elle n'est pas imposée par la physique.

5 Unités SI de base

- 5.1 Unité de temps (seconde)
La seconde, *s*, est l'unité de durée ; sa valeur est définie en fixant la valeur du nombre de périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température du zéro absolu à exactement 9 192 631 770 quand elle est exprimée en s^{-1} .
- 5.2 Unité de longueur (mètre)
Le mètre, *m*, est l'unité de longueur ; sa valeur est définie en fixant la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide à exactement 299 792 458 quand elle est exprimée en $m s^{-1}$.
- 5.3 Unité de masse (kilogramme)
Le kilogramme est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, *h*, égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$

lorsqu'elle est exprimée en J.s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

- 5.4 Unité de courant électrique (ampère)
L'ampère, A, est l'unité du courant électrique ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ quand elle est exprimée en A s, ce qui correspond à des C.
- 5.5 Unité de température thermodynamique (kelvin)
Le kelvin, K, est l'unité thermodynamique de température ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quand elle est exprimée en $\text{s}^{-2} \text{m}^2 \text{kg K}^{-1}$, ce qui correspond à des J K^{-1} .
- 5.6 Unité de quantité de matière (mole)
La mole, mol, est l'unité de quantité de matière d'une entité élémentaire spécifique, qui peut être un atome, une molécule, un ion, un électron ou n'importe quelle autre particule ou groupe particulier de ces particules ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ quand elle est exprimée en mol^{-1} .
- 5.7 Unité d'intensité lumineuse (candela)
- 5.8 Résumé des unités de base et symboles des unités de base

6 Unités SI dérivées

- 6.1 Unités exprimées à partir des unités de base
- 6.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ; unités utilisant des unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers
- 6.3 Exercices de réduction d'unités aux unités de base

7 Ordres de grandeurs en physique

8 Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI : préfixes SI

Tableau 5. Préfixes SI

Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	déci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	milli	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	téra	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	méga	M	10^{-15}	femto	f
10^3	kilo	k	10^{-18}	atto	a
10^2	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	déca	da	10^{-24}	yocto	y

9 Etalons auxiliaires

10 Constantes physiques

11 Analyse dimensionnelle

Annexe 1 : étymologie des noms d'unités

Annexe 2 : typographie des unités