

SOMMAIRE

Section A : essentiel du cours et exercices supplémentaires corrigés

Partie 1 ▶ Atome, spectroscopie, généralités

> Chapitre 1 : l'atome	6
> Chapitre 2 : spectroscopie	10
> Chapitre 3 : classification périodique	18
> Chapitre 4 : transferts d'énergie, théorème de l'énergie cinétique, courant électrique	22
> Chapitre 5 : principe du laser	26
> Chapitre 6 : spectroscopie X	32
> Chapitre 7 : résonance magnétique nucléaire	37

Partie 2 ▶ Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

> Chapitre 8 : effet photoélectrique	42
> Chapitre 9 : interaction des photons avec la matière	48
> Chapitre 10 : interaction des particules chargées avec la matière	54

Partie 3 ▶ Noyau, radioactivité

> Chapitre 11 : le noyau atomique	60
> Chapitre 12 : les réactions nucléaires spontanées	64
> Chapitre 13 : les réactions nucléaires provoquées	70

Partie 4 ▶ Mécanique, particules chargées

> Chapitre 14 : notions de mécanique	78
> Chapitre 15 : champ électrique et particules chargées	85
> Chapitre 16 : champ magnétique et particules chargées	92

Partie 5 ▶ Électricité

> Chapitre 17 : circuits électriques en régime sinusoïdal forcé	102
> Chapitre 18 : notions d'électronique	112

Partie 6 ▶ Acoustique

> Chapitre 19 : les ondes sonores	124
> Chapitre 20 : les ondes ultrasonores	129

Section B : sujets d'annales corrigés

> Session 2009	135
> Session 2008	145
> Session 2007	155
> Session 2006	165
> Session 2005	175
> Session 2004	182
> Session 2003	194
> Session 2002	204
> Session 2001	213
> Session 2000	220
> Session 1999	230
> Session 1998	238

PARTIE 1

ATOME, SPECTROSCOPIE, GÉNÉRALITÉS

> Chapitre 1 : l'atome.....	6
> Chapitre 2 : spectroscopie	10
> Chapitre 3 : classification périodique.....	18
> Chapitre 4 : transferts d'énergie, théorème de l'énergie cinétique, courant électrique.....	22
> Chapitre 5 : principe du laser.....	26
> Chapitre 6 : spectroscopie X.....	32
> Chapitre 7 : résonance magnétique nucléaire.....	37

CHAPITRE 1 / L'ATOME

1 Essentiel du cours

I – Structure lacunaire de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau central autour duquel gravitent des électrons.

La matière est essentiellement constituée de vide ; en effet le noyau, qui renferme pratiquement toute la masse de l'atome (à plus de 99,9 %), occupe une place minuscule au centre de celui-ci. Si l'on représente le noyau par une balle de diamètre 10 cm, alors il faudrait prendre une sphère de diamètre 10 km pour représenter l'atome et cet espace énorme est occupé par les électrons qui ont une masse négligeable.

Le noyau renferme des nucléons (protons et neutrons) qui ont des masses sensiblement égales. Les protons portent une charge élémentaire positive ($q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) alors que les neutrons sont électriquement neutres.

Les électrons portent une charge élémentaire négative ($q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

Un atome est globalement neutre car il y a autant de protons dans le noyau que d'électrons dans le nuage électronique.

Les électrons sont répartis en couches électroniques notées respectivement K, L, M, N, O, etc.

Règle de Pauli :

une couche de rang n ($n = 1$ pour la couche K, $n = 2$ pour la couche L, etc.) peut accueillir au maximum $2n^2$ électrons.

II – Notations et définitions

Notation conventionnelle : ${}_Z^A X^n$

A : nombre de masse (nombre de nucléons).

Z : nombre de charge ou numéro atomique (nombre de protons).

X : symbole de l'élément chimique (voir un tableau de classification périodique).

n : charge éventuelle (positive pour un cation, négative pour un anion, nulle pour un atome).

Élément chimique : il est caractérisé par le nombre de protons dans le noyau que l'on appelle nombre de charge ou numéro atomique noté Z.
($Z = 6$: élément carbone ; $Z = 8$: élément oxygène).

Nucléide : il est caractérisé à la fois par le nombre de charge Z et par le nombre de nucléons dans le noyau appelé nombre de masse et noté A.

(${}_1^1\text{H}^+$; ${}_6^{12}\text{C}$; ${}_8^{16}\text{O}^{2-}$).

Isotopes : nucléides ayant le même nombre de charge Z mais des nombres de masse A différents.

(${}_6^{12}\text{C}$ et ${}_6^{14}\text{C}$).

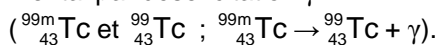
Isobares : nucléides ayant le même nombre de masse A mais des nombres de charge Z différents.

(${}_6^{14}\text{C}$ et ${}_7^{14}\text{N}$).

Isotones : nucléides ayant le même nombre de neutrons N mais des nombres de charge Z différents.

(${}_6^{12}\text{C}$ et ${}_5^{11}\text{B}$).

Isomères nucléaires : nucléides ayant le même nombre de charge Z et le même nombre de masse A . L'un est dans un état excité à longue durée de vie (état métastable). Il rejoint son état fondamental par désexcitation γ .



III – Les nombres quantiques

Le nombre quantique principal : n (entier positif non nul).

Il désigne le numéro de la couche électronique principale.

($n = 1$: couche K, $n = 2$: couche L, $n = 3$: couche M, *etc.*).

Le nombre quantique secondaire (ou azimutal) : ℓ (entier positif ou nul).

Les couches électroniques principales renferment des sous-couches appelées orbitales de type s, p, d, f, g, *etc.* Le nombre quantique secondaire qui est tel que $0 \leq \ell < n$ définit le type d'orbitales dans les différents niveaux.

($\ell = 0$: type s, $\ell = 1$: type p, $\ell = 2$: type d, $\ell = 3$: type f, $\ell = 4$: type g, *etc.*).

Remarque

Dans une couche de rang n , il y a n types d'orbitales.

Par exemple, pour la couche M ($n = 3$), ℓ peut prendre les valeurs $\ell = 0$ (type s), $\ell = 1$ (type p) et $\ell = 2$ (type d) ; il y a donc 3 types d'orbitales au niveau 3. De même au niveau 4, il y a 4 types d'orbitales (s, p, d et f), ℓ pouvant prendre les valeurs 0, 1, 2 et 3.

Le nombre quantique magnétique : m_ℓ (entier relatif tel que $-\ell \leq m_\ell \leq +\ell$).

Il indique le nombre d'orbitales de chaque type ; il y a autant d'orbitales d'un type donné que de valeurs possibles pour m_ℓ .

Pour $\ell = 0$, $m_\ell = 0$; il n'y a qu'une orbitale de type s.

Pour $\ell = 1$, $m_\ell = -1, 0$ et 1 ; il y a 3 orbitales de type p.

Pour $\ell = 2$, $m_\ell = -2, -1, 0, 1$ et 2 ; il y a 5 orbitales de type d.

Pour $\ell = 3$, $m_\ell = -3, -2, -1, 0, 1, 2$ et 3 ; il y a 7 orbitales de type f.

Le nombre quantique magnétique de spin : m_s .

Il traduit le fait que l'électron peut tourner sur lui-même dans un sens ou dans l'autre.

Ce nombre quantique ne prend ainsi que 2 valeurs $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$.

Remarque

Une orbitale quelconque peut accueillir au maximum 2 électrons qui ont alors des nombres quantiques magnétiques de spin opposés.

Représentation conventionnelle : $\boxed{\uparrow\downarrow}$

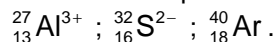
La case représente l'orbitale, les flèches représentent respectivement les valeurs :

$m_s = \frac{1}{2}$ (rotation de l'électron dans un sens) et $m_s = -\frac{1}{2}$ (rotation de l'électron dans l'autre sens).

2 Exercices corrigés

Application 1

Donner la composition du noyau et du nuage électronique des espèces suivantes :



- ${}_{13}^{27}\text{Al}^{3+}$ est un cation dont le noyau comporte 13 protons et $27 - 13 = 14$ neutrons, son nuage électronique renferme $13 - 3 = 10$ électrons (on a retiré 3 électrons pour passer de l'atome d'aluminium à l'ion aluminium III).
- ${}_{16}^{32}\text{S}^{2-}$ est un anion dont le noyau comporte 16 protons et $32 - 16 = 16$ neutrons, son nuage électronique renferme $16 + 2 = 18$ électrons (on a rajouté 2 électrons pour passer de l'atome de soufre à l'ion sulfure).
- ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ est un atome dont le noyau comporte 18 protons et $40 - 18 = 22$ neutrons, son nuage électronique renferme autant d'électrons que de protons puisqu'il s'agit d'un atome c'est-à-dire 18.

Application 2

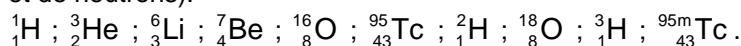
En appliquant la règle de Pauli, calculer le nombre maximum d'électrons dans les couches K, L, M et N.

Si n est le numéro de la couche, le nombre maximum d'électrons présents est $2n^2$.

Couche	n	Nombre maximum d'électrons = $2n^2$
K	1	$2.1^2 = 2$ électrons
L	2	$2.2^2 = 8$ électrons
M	3	$2.3^2 = 18$ électrons
N	4	$2.4^2 = 32$ électrons

Application 3

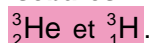
Parmi les nucléides suivants, identifier les isotopes, les isobares, les isotones et les isomères nucléaires. (On pourra s'aider d'un tableau indiquant pour chaque espèce le nombre de protons et de neutrons).



Espèce	Nombre de protons Z	Nombre de neutrons N = A - Z
${}_{1}^1\text{H}$	1	0
${}_{2}^3\text{He}$	2	1
${}_{3}^6\text{Li}$	3	3
${}_{4}^7\text{Be}$	4	3
${}_{8}^{16}\text{O}$	8	8
${}_{43}^{95}\text{Tc}$	43	52
${}_{1}^2\text{H}$	1	1
${}_{8}^{18}\text{O}$	8	10
${}_{1}^3\text{H}$	1	2
${}_{43}^{95\text{m}}\text{Tc}$	43	52

Isotopes : même nombre de protons (Z) mais des nombres de neutrons (N) ou des nombres de nucléons (A) différents. D'une part (${}_{1}^1\text{H} ; {}_{1}^2\text{H} ; {}_{1}^3\text{H}$) et d'autre part (${}_{8}^{16}\text{O} ; {}_{8}^{18}\text{O}$).

Isobares : même nombre de nucléons (A) mais des nombres de protons (Z) différents.



Isotones : même nombre de neutrons (N) mais des nombres de protons (Z) différents.

D'une part (${}^3_2\text{He}$; ${}^2_1\text{H}$) et d'autre part (${}^6_3\text{Li}$; ${}^7_4\text{Be}$).

Isomères nucléaires : mêmes nombres de protons (Z) et mêmes nombres de nucléons (A) ; l'un des nucléides est dans un état métastable.

${}^{95}_{43}\text{Tc}$ et ${}^{95\text{m}}_{43}\text{Tc}$.

Application 4

En raisonnant sur les différentes orbitales présentes au niveau $n = 3$ (couche M), déterminer le nombre maximum d'électrons pouvant occuper ce niveau.

Comparer cette valeur à celle donnée par la règle de Pauli.

Établissons un tableau avec les différentes valeurs du nombre quantique secondaire ℓ (déterminant le type d'orbitale) et du nombre quantique magnétique m_ℓ (déterminant le nombre d'orbitales de même type).

On rappelle que $0 \leq \ell < n$ et $-\ell \leq m_\ell \leq +\ell$.

n	3		
Désignation de la couche	M		
ℓ	0	1	2
Type d'orbitale	s	p	d
m_ℓ	0	-1 ; 0 ; 1	-2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2
Nombre d'orbitales de chaque type	1	3	5
Nombre total d'orbitales	9		

Chaque orbitale peut accueillir 2 électrons, on a donc au maximum 18 électrons sur le niveau $n = 3$.

D'après la règle de Pauli $N_{e^- \text{maxi}} = 2 n^2 = 2 \cdot 3^2 = 18$ électrons, on retrouve bien sûr la même valeur qu'en raisonnant sur les orbitales.

CHAPITRE 2 / SPECTROSCOPIE

1 Essentiel du cours

I – Les relations de Planck-Einstein

Dans le modèle corpusculaire de la lumière, celle-ci est assimilée à un ensemble de particules appelées « photons » de masse nulle, se déplaçant à la célérité $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide et dans l'air et à une vitesse $v < c$ dans les autres milieux transparents.

Chaque photon porte un « **quantum d'énergie** », c'est-à-dire une quantité élémentaire d'énergie

lumineuse donnée par les relations de Planck-Einstein : $E = hv = h \frac{c}{\lambda}$.

h : constante de Planck ($6,62.10^{-34} \text{ J.s}$).

ν : fréquence de la lumière (Hz).

$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ (si le photon évolue dans le vide ou dans l'air, sinon prendre la valeur $v = \frac{c}{n}$ lorsque

le photon évolue dans un milieu transparent d'indice de réfraction n).

λ : longueur d'onde de la lumière (m).

E : énergie du photon (J).

Remarque

On exprime souvent l'énergie du photon en électronvolt ($1 \text{ eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$).

II – Les spectres lumineux



Spectre d'émission continu de la lumière blanche (infinité de raies)



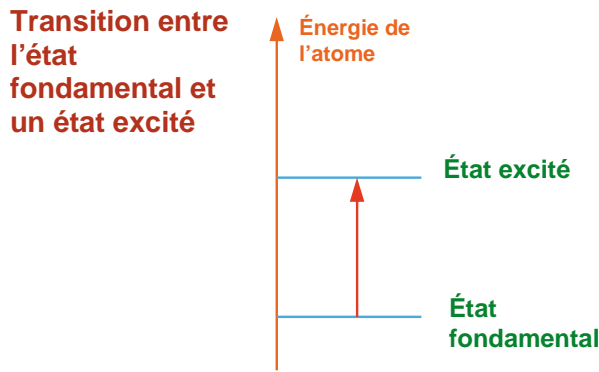
Spectre d'émission discontinu du sodium (2 raies)



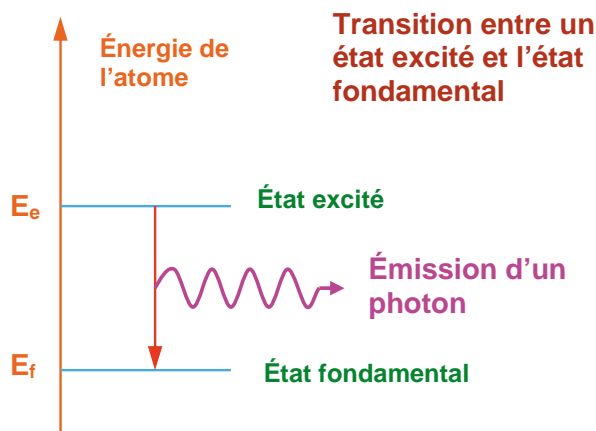
Spectre d'émission discontinu de l'hydrogène (4 raies)

Les spectres d'émission continus sont obtenus à partir du soleil, des étoiles et des lampes à incandescence. Dans le visible, ces spectres renferment toutes les radiations de longueurs d'onde comprises entre 400 et 800 nm.

Les spectres d'émission discontinus sont obtenus à partir de lampes à gaz ou à vapeurs métalliques (H, Na, Hg, etc.). Dans ce cas, les atomes sont tout d'abord excités par un dispositif extérieur (haute tension par exemple) faisant passer les atomes de leur état initial (état fondamental) à un état d'énergie plus grande (état excité). Ce saut énergétique est appelé « **transition** ».



L'atome n'est pas en situation stable lorsqu'il est excité, il revient alors spontanément vers son état fondamental en expulsant l'excès d'énergie sous forme d'un photon (**transition radiative**).



L'énergie du photon émis est : $E_{\text{photon}} = E_e - E_f = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$; il a donc une fréquence, une longueur

d'onde et une couleur (s'il est visible) bien déterminées.

D'une façon générale, plusieurs états excités différents sont possibles, on a donc plusieurs transitions possibles et on observe ainsi plusieurs raies sur le spectre d'émission.

III – Étude du spectre d'émission de l'hydrogène

Il présente 4 raies dans le visible (voir schéma du § II).

Une raie orange : H_α de longueur d'onde 656 nm.

Deux raies bleues : H_β et H_γ de longueurs d'onde 486 et 434 nm.

Une raie violette : H_δ de longueur d'onde 410 nm.

En procédant par tâtonnements, Balmer (en 1885), puis Rydberg (en 1890), établirent des relations empiriques permettant de retrouver par le calcul les longueurs d'onde des 4 raies visibles de l'hydrogène.

Relation de Balmer : $\lambda(\text{nm}) = 364,6 \frac{n^2}{n^2 - 4}$ (n étant un entier supérieur à 2).

Relation de Rydberg : $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$

$\bar{\nu}$ (m^{-1}) est appelé le nombre d'onde. C'est l'inverse de la longueur d'onde.

λ (m) est la longueur d'onde recherchée.

R_H est la constante de Rydberg pour l'hydrogène de valeur $10967757,6 \text{ m}^{-1}$.

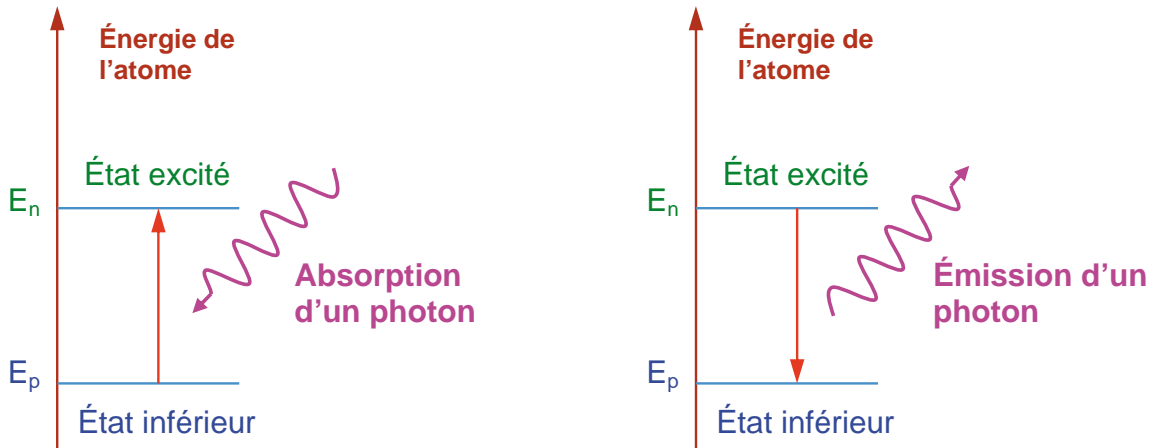
n est un nombre entier supérieur à 2.

Un peu plus tard, en 1913, Bohr élabora une nouvelle théorie (mécanique quantique) permettant d'interpréter les relations empiriques de Balmer et Rydberg. Il proposa ainsi un modèle, pour l'atome d'hydrogène, s'appuyant sur trois postulats.

- L'atome d'hydrogène ne peut exister que dans certains états énergétiques $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ (on dit que les énergies sont quantifiées).

E_1 : état fondamental ; E_2, \dots, E_n : états excités.

- Le passage d'un état énergétique à un autre (transition) s'accompagne de l'absorption ou de l'émission d'un photon, **l'atome ne pouvant absorber que les photons qu'il est lui-même capable d'émettre.**



- La distance moyenne noyau-électron augmente avec l'énergie de l'atome. Pour une certaine énergie $E_i = 13,6$ eV, appelée énergie d'ionisation, l'électron infiniment éloigné quitte l'atome. **Conventionnellement, on choisit cet état comme référence d'énergie nulle** et dans ces conditions, l'énergie de l'atome d'hydrogène dans l'état E_n (lorsque l'électron occupe le niveau n) est

donnée par la relation de Bohr : $E_n(\text{eV}) = -\frac{E_i}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2}$ (n étant le nombre quantique principal).

L'énergie du photon émis lorsque l'atome passe d'un niveau supérieur E_n vers un niveau inférieur E_p

est : $E_{\text{photon}}(\text{eV}) = E_n - E_p = 13,6 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.

Différents physiciens ont travaillé sur le spectre d'émission de l'hydrogène aussi bien dans le visible que dans l'ultraviolet ou l'infrarouge. Ils ont ainsi mis en évidence et vérifié, par le calcul, différentes raies constituant des séries qui portent leurs noms.

Série de Balmer : ensemble des transitions aboutissant au niveau 2 (dans le visible et l'UV).

Série de Lyman : ensemble des transitions aboutissant au niveau 1 (dans l'UV).

Série de Paschen : ensemble des transitions aboutissant au niveau 3 (dans l'IR), etc.

Remarque

Si l'on augmente la tension d'excitation d'une lampe à hydrogène, il y a ionisation des atomes se traduisant par l'apparition d'un spectre d'émission continu et non plus de raies.

IV – Spectres d'émission des autres atomes

On appelle ion hydrogénoïde, un cation renfermant un seul électron ($\text{He}^+, \text{Li}^{2+}, \text{Be}^{3+}$, etc.)

Dans ce cas, la relation de Rydberg s'écrit : $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda_{n \rightarrow p}} = R_H Z^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.

$\lambda_{n \rightarrow p}$: longueur d'onde de la transition du niveau n vers le niveau p (n et p étant des entiers avec $n > p$).

Z : numéro atomique de l'ion hydrogénoïde.

Dans le cas d'un atome à plusieurs électrons, la relation de Rydberg devient :

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda_{n \rightarrow p}} = R_H (Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right);$$

la donnée supplémentaire σ par rapport à l'expression précédente est appelée constante d'écran. Elle est due à l'influence des électrons situés entre l'électron actif (responsable des raies) et le noyau.

2 Exercices corrigés

Application 1

Quelle est la fréquence d'un photon de longueur d'onde 535 nm ? Ce photon est-il visible ? Quelle est son énergie (en J et en eV) ?

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{535 \cdot 10^{-9}} = 5,61 \cdot 10^{14} \text{ Hz. Ce photon est visible car sa longueur d'onde est comprise entre 400 et 800 nm.}$$

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 6,62 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{535 \cdot 10^{-9}} = 3,71 \cdot 10^{-19} \text{ J ; } E(\text{eV}) = \frac{3,71 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,32 \text{ eV.}$$

On aurait pu également appliquer la relation $E = h\nu$.

Application 2

La raie jaune très intense émise par une lampe au sodium est en fait constituée de deux raies, de longueurs d'onde $\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$. Elles correspondent à une désexcitation de l'atome de sodium, à partir de deux niveaux d'énergie très proches, vers l'état fondamental. Calculer la différence d'énergie entre les deux niveaux, en eV.

$$E_{\text{photon 1}}(\text{eV}) = h \frac{c}{\lambda_1} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{589 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,107 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 2}}(\text{eV}) = h \frac{c}{\lambda_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{589,6 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,105 \text{ eV}$$

La différence d'énergie est : $\Delta E = E_{\text{photon 1}} - E_{\text{photon 2}} = 2,107 - 2,105 = 0,002 \text{ eV.}$

Application 3

L'énergie du niveau 2 de l'atome d'hydrogène est égale à $-3,4 \text{ eV}$. Sachant que les 4 raies du spectre visible de l'hydrogène correspondent aux transitions $3 \rightarrow 2$, $4 \rightarrow 2$, $5 \rightarrow 2$ et $6 \rightarrow 2$, calculer les énergies des niveaux 3, 4, 5 et 6.

$\lambda_1 = 656 \text{ nm}$ (H_α : transition $3 \rightarrow 2$) ; $\lambda_2 = 486 \text{ nm}$ (H_β : transition $4 \rightarrow 2$) ; $\lambda_3 = 434 \text{ nm}$ (H_γ : transition $5 \rightarrow 2$) ; $\lambda_4 = 410 \text{ nm}$ (H_δ : transition $6 \rightarrow 2$).

$$E_{\text{photon 1}}(\text{eV}) = h \frac{c}{\lambda_1} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{656 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,89 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 1}} = E_3 - E_2 ; E_3 = E_2 + E_{\text{photon 1}} = -3,4 + 1,89 = -1,51 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 2}}(\text{eV}) = h \frac{c}{\lambda_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{486 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,55 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 2}} = E_4 - E_2 ; E_4 = E_2 + E_{\text{photon 2}} = -3,4 + 2,55 = -0,85 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 3}}(\text{eV}) = h \frac{c}{\lambda_3} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{434 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,86 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 3}} = E_5 - E_2 ; E_5 = E_2 + E_{\text{photon 3}} = -3,4 + 2,86 = -0,54 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 4}}(\text{eV}) = h \frac{c}{\lambda_4} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{410 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,03 \text{ eV.}$$

$$E_{\text{photon 4}} = E_6 - E_2 ; E_6 = E_2 + E_{\text{photon 4}} = -3,4 + 3,03 = -0,37 \text{ eV.}$$

Application 4

En utilisant la relation de Balmer : $\lambda(\text{nm}) = 364,6 \frac{n^2}{n^2 - 4}$ (n entier supérieur à 2), retrouver les longueurs d'onde des 4 raies visibles du spectre d'émission de l'hydrogène (H_α : 656 nm ; H_β : 486 nm ; H_γ : 434 nm et H_δ : 410 nm).

On remplace n par 3, 4, 5 puis 6.

$$H_\alpha : \lambda(\text{nm}) = 364,6 \frac{3^2}{3^2 - 4} = 656 \text{ nm.}$$

$$H_\beta : \lambda(\text{nm}) = 364,6 \frac{4^2}{4^2 - 4} = 486 \text{ nm.}$$

$$H_\gamma : \lambda(\text{nm}) = 364,6 \frac{5^2}{5^2 - 4} = 434 \text{ nm.}$$

$$H_\delta : \lambda(\text{nm}) = 364,6 \frac{6^2}{6^2 - 4} = 410 \text{ nm.}$$

Application 5

En utilisant la relation de Rydberg : $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$ (n entier supérieur à 2), retrouver les longueurs d'onde des 4 raies visibles du spectre d'émission de l'hydrogène (H_α : 656 nm ; H_β : 486 nm ; H_γ : 434 nm et H_δ : 410 nm). On rappelle que $R_H = 10967757,6 \text{ m}^{-1}$.

On isole λ et on remplace n par 3, 4, 5 puis 6.

$$\lambda = \frac{1}{R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}$$

$$H_\alpha : \lambda = \frac{1}{10967757,6 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2} \right)} = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 656 \text{ nm.}$$

$$H_\beta : \lambda = \frac{1}{10967757,6 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4^2} \right)} = 4,86 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 486 \text{ nm.}$$

$$H_\gamma : \lambda = \frac{1}{10967757,6 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5^2} \right)} = 4,34 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 434 \text{ nm.}$$

$$H_\delta : \lambda = \frac{1}{10967757,6 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6^2} \right)} = 4,10 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 410 \text{ nm.}$$

Application 6

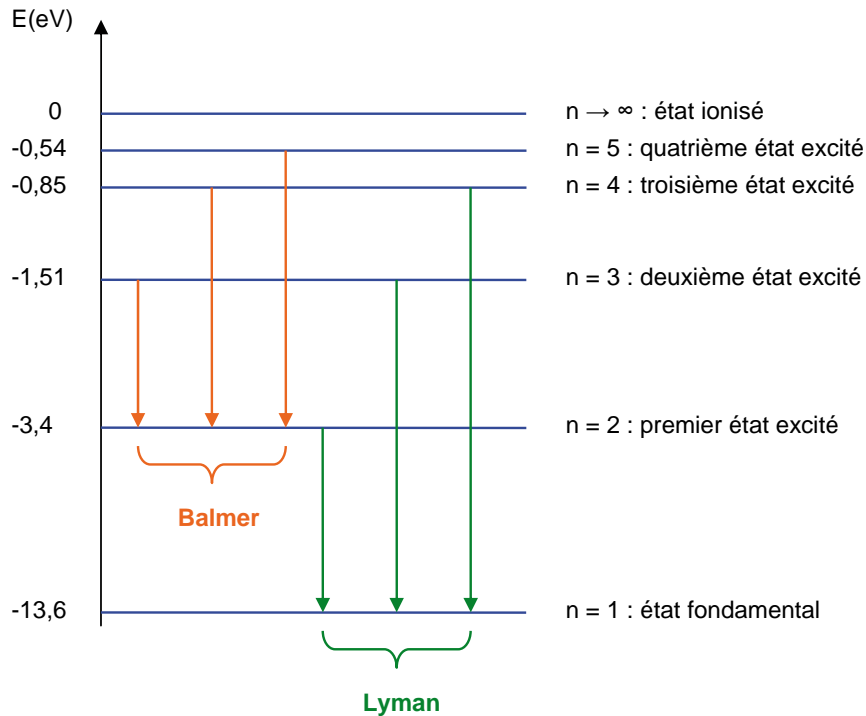
À partir de la relation de Bohr : $E_n(\text{eV}) = -\frac{13,6}{n^2}$ (n étant le nombre quantique principal c'est-à-dire un entier ≥ 1), calculer les énergies des 5 premiers niveaux de l'hydrogène et représenter le diagramme correspondant sans souci d'échelle.

Retrouver à partir des résultats précédents, les longueurs d'onde des 3 premières raies visibles de la série de Balmer (transitions $3 \rightarrow 2$, $4 \rightarrow 2$ et $5 \rightarrow 2$). Représenter ces transitions sur le schéma.

Calculer les longueurs d'onde des trois premières raies de la série de Lyman (transitions 2→1, 3→1 et 4→1). Dans quel domaine des radiations électromagnétiques sont émis ces photons ? Représenter ces transitions sur le schéma.

$$E_1(\text{eV}) = -\frac{13,6}{1^2} = -13,6 \text{ eV} ; E_2(\text{eV}) = -\frac{13,6}{2^2} = -3,4 \text{ eV} ; E_3(\text{eV}) = -\frac{13,6}{3^2} = -1,51 \text{ eV} ;$$

$$E_4(\text{eV}) = -\frac{13,6}{4^2} = -0,85 \text{ eV} ; E_5(\text{eV}) = -\frac{13,6}{5^2} = -0,54 \text{ eV} .$$



$$E_{\text{photon } 3 \rightarrow 2} = E_3 - E_2 = \frac{hc}{\lambda_{3 \rightarrow 2}} ;$$

$$\text{d'où } \lambda_{3 \rightarrow 2} = \frac{hc}{E_3 - E_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-1,51 - (-3,4)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,57 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 657 \text{ nm} .$$

Attention : le calcul doit se faire en u.s.i., il faut donc exprimer la différence d'énergie $E_3 - E_2$ en Joules. Pour cela, on doit multiplier par $1,6 \cdot 10^{-19}$ au dénominateur car $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

$$\text{De même } \lambda_{4 \rightarrow 2} = \frac{hc}{E_4 - E_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0,85 - (-3,4)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,87 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 487 \text{ nm} .$$

$$\text{Et } \lambda_{5 \rightarrow 2} = \frac{hc}{E_5 - E_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0,54 - (-3,4)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,34 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 434 \text{ nm} .$$

On effectue des calculs du même type pour la série de Lyman :

$$\lambda_{2 \rightarrow 1} = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-3,4 - (-13,6)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,22 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 122 \text{ nm} .$$

$$\lambda_{3 \rightarrow 1} = \frac{hc}{E_3 - E_1} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-1,51 - (-13,6)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 103 \text{ nm} .$$

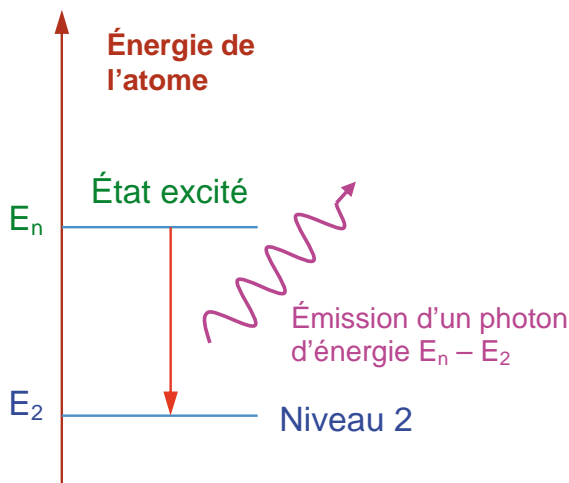
$$\lambda_{4 \rightarrow 1} = \frac{hc}{E_4 - E_1} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0,85 - (-13,6)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 9,7 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 97 \text{ nm} .$$

La série de Lyman est dans l'ultraviolet puisque les longueurs d'onde sont inférieures à 400 nm.

Application 7

En considérant, pour un atome d'hydrogène, la transition d'un niveau excité $n > 2$ vers le niveau 2, produisant l'émission d'un photon de longueur d'onde $\lambda_{n \rightarrow 2}$, montrer que la relation de Bohr :

$$E_n(\text{eV}) = -\frac{13,6}{n^2} \text{ permet de retrouver la relation empirique de Rydberg } \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right).$$



$$E_{\text{photon}} = E_n - E_2 = \frac{hc}{\lambda_{n \rightarrow 2}} \text{ avec } E_n(\text{eV}) = -\frac{13,6}{n^2} \text{ et } E_2(\text{eV}) = -\frac{13,6}{2^2} = -\frac{13,6}{4}.$$

$$\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow 2}} = \frac{E_n - E_2}{hc} = \frac{\left(-\frac{13,6}{n^2} - \left(-\frac{13,6}{4} \right) \right) 1,6 \cdot 10^{-19}}{hc} = \frac{13,6 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = \underbrace{1,096 \cdot 10^7}_{R_H} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

On retrouve bien la relation de Rydberg.

Remarque

La relation de Rydberg peut se généraliser à des séries autres que celle de Balmer. Si on appelle p le niveau d'arrivée, alors la longueur d'onde de la transition $n \rightarrow p$ est telle que :

$$\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow p}} = R_H \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right). \text{ Pour } p = 1, \text{ on a la série de Lyman ; pour } p = 2 \text{ (série de Balmer) on}$$

retrouve la relation initiale puisque dans ce cas $\frac{1}{p^2} = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}$.

Application 8

Pourquoi l'ion Be^{3+} ($Z = 4$) est-il un ion hydrogénoïde ?

À partir de la relation $\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow p}} = R_H Z^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ calculer la longueur d'onde du photon émis lors de la transition du niveau 3 vers le niveau 1.

L'ion Be^{3+} ne renferme qu'un seul électron, c'est donc un ion hydrogénoïde.

$$\lambda_{n \rightarrow p} = \frac{1}{R_H Z^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)} ; \text{ on remplace } n \text{ par } 3 \text{ et } p \text{ par } 1.$$

$$\lambda_{3 \rightarrow 1} = \frac{1}{1,097 \cdot 10^7 \cdot 4^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right)} = 6,41 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 6,41 \text{ nm}.$$

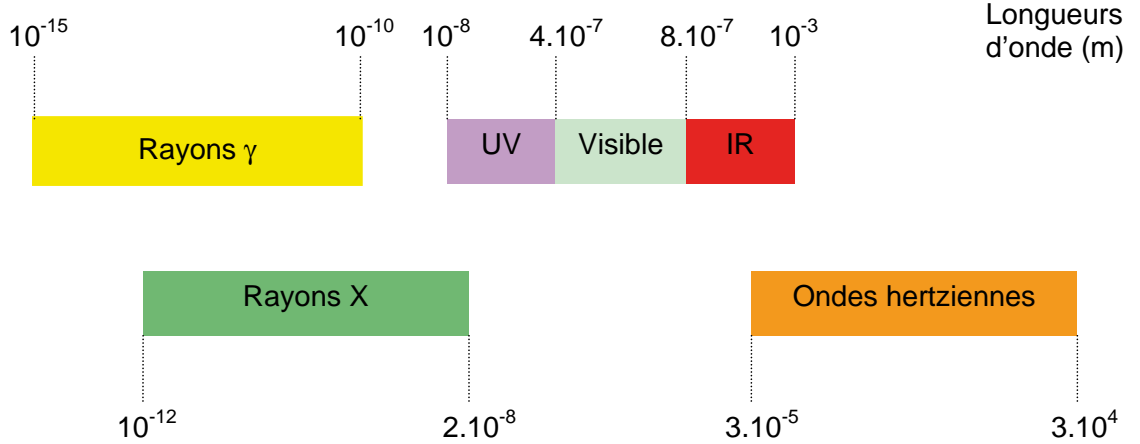
Application 9

On considère un atome de chlore ($Z = 17$). Sa répartition électronique par couches principales est $K^2L^8M^7$, c'est-à-dire 2 électrons dans la couche K (couche saturée), 8 électrons dans la couche L (saturée), le reste des électrons dans la couche M (non saturée). Un apport d'énergie fait passer un électron de la couche L vers la couche M (transition $2 \rightarrow 3$). Il y a ensuite émission d'un photon lorsque l'électron excité retrouve sa couche initiale (transition $3 \rightarrow 2$). En

utilisant la relation $\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow p}} = R_H (Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, calculer la longueur d'onde du photon émis.

Donnée : la constante d'écran vaut ici $\sigma = 7,4$.

En vous aidant du diagramme suivant, dire dans quel domaine des ondes électromagnétiques est émis ce photon.



Calculer l'énergie de ce photon.

$$\lambda_{n \rightarrow p} = \frac{1}{R_H (Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)} ; \text{ on remplace } n \text{ par } 3 \text{ et } p \text{ par } 2.$$

$$\lambda_{3 \rightarrow 2} = \frac{1}{1,097 \cdot 10^7 (17 - 7,4)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)} = 7,12 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 7,12 \text{ nm}.$$

Ce photon est dans le domaine des rayons X de faible énergie.

$$E_{\text{photon}} = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{7,12 \cdot 10^{-9}} = 2,79 \cdot 10^{-17} \text{ J} = \frac{2,79 \cdot 10^{-17}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 174 \text{ eV}.$$

CHAPITRE 3 / CLASSIFICATION PÉRIODIQUE

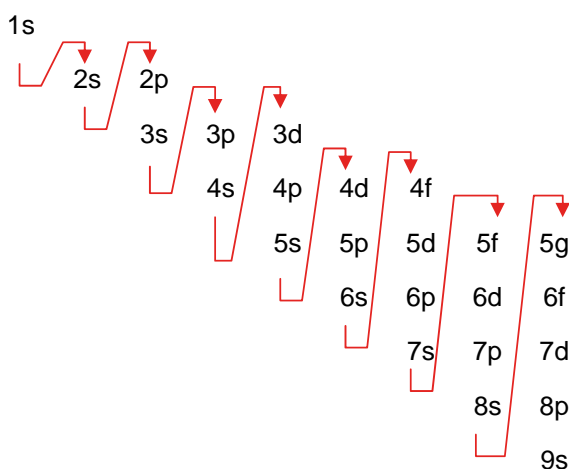
1 Essentiel du cours

I – Configuration électronique

Principe d'exclusion de Pauli : 2 électrons d'un même atome ne peuvent exister dans le même état quantique (n , ℓ , m_ℓ et m_s), il faut que l'un au moins des nombres quantiques soit différent.

Règle de Hund : les électrons occupent le nombre maximum d'orbitales de même type avant de saturer chaque orbitale à 2 électrons de nombres quantiques magnétiques de spin opposés.

Règle de Klechkowski : elle indique l'ordre de remplissage des différentes orbitales (cette règle présente néanmoins quelques exceptions qu'il n'est pas nécessaire de connaître).



C'est-à-dire : $1s \rightarrow 2s \rightarrow 2p \rightarrow 3s \rightarrow 3p \rightarrow 4s \rightarrow 3d \rightarrow 4p \rightarrow 5s \rightarrow 4d$, etc.

Rappelons qu'il y a 1 orbitale s (2 électrons au maximum), 3 orbitales p (6 électrons au maximum), 5 orbitales d (10 électrons au maximum), 7 orbitales f (14 électrons au maximum), etc. (On a à chaque fois 2 orbitales de plus lorsqu'on passe d'un type d'orbitales au suivant).

II – La classification périodique à 18 colonnes

Les éléments chimiques sont classés horizontalement par numéros atomiques croissants en allant à la ligne à chaque fois qu'une nouvelle orbitale s commence à se remplir.

1 1,0 H Hydrogène																	2 4,0 He Hélium
3 6,9 Li Lithium	4 9,0 Be Béryllium											5 10,8 B Bore	6 12,0 C Carbone	7 14,0 N Azote	8 16,0 O Oxygène	9 19,0 F Fluor	10 20,2 Ne Néon
11 23,0 Na Sodium	12 24,3 Mg Magnésium											13 27,0 Al Aluminium	14 28,1 Si Silicium	15 31,0 P Phosphore	16 32,1 S Soufre	17 35,5 Cl Chlore	18 39,9 Ar Argon
19 39,1 K Potassium	20 40,1 Ca Calcium	21 45,0 Sc Scandium	22 47,9 Ti Titane	23 50,9 V Vanadium	24 52,0 Cr Chrome	25 54,9 Mn Manganèse	26 55,8 Fe Fer	27 58,9 Co Cobalt	28 58,7 Ni Nickel	29 63,5 Cu Cuivre	30 65,4 Zn Zinc	31 69,7 Ga Gallium	32 72,6 Ge Germanium	33 74,9 As Arsenic	34 79,0 Se Sélénium	35 79,9 Br Brome	36 83,8 Kr Krypton
37 85,5 Rb Rubidium	38 87,6 Sr Strontium	39 88,9 Y Yttrium	40 91,2 Zr Zirconium	41 92,9 Nb Niobium	42 95,9 Mo Molybdène	43 99 Tc Technétium	44 101,1 Ru Ruthénium	45 102,9 Rh Rhodium	46 106,4 Pd Paladium	47 107,9 Ag Argent	48 112,4 Cd Cadmium	49 114,8 In Indium	50 118,7 Sn Étain	51 121,8 Sb Antimoine	52 127,6 Te Tellure	53 126,9 I Iode	54 131,3 Xe Xénon
55 132,9 Cs Césium	56 137,3 Ba Baryum	57 138,9 La Lanthane	72 178,5 Hf Hafnium	73 180,9 Ta Tantale	74 183,9 W Tungstène	75 186,2 Re Rhenium	76 190,2 Os Osmium	77 192,2 Ir Iridium	78 195,1 Pt Platine	79 197,0 Au Or	80 200,6 Hg Mercure	81 204,4 Tl Thallium	82 207,2 Pb Plomb	83 209,0 Bi Bismuth	84 210 Po Polonium	85 210 At Astaté	86 222 Rn Radon
87 223 Fr Francium	88 226 Ra Radium	89 227 Ac Actinium															
		VI		58 140,1 Ce Cérium	59 140,9 Pr Praseodyme	60 144,2 Nd Néodyme	61 145 Pm Prométhium	62 150,4 Sm Samarium	63 152,0 Eu Europium	64 157,3 Gd Gadolinium	65 158,9 Tb Terbium	66 162,5 Dy Dysprosium	67 164,9 Ho Holmium	68 167,3 Er Erbium	69 168,9 Tm Thulium	70 173,0 Yb Ytterbium	71 175,0 Lu Lutétium
		VII		90 232,0 Th Thorium	91 231,0 Pa Protactinium	92 238,0 U Uranium	93 237,0 Np Neptunium	94 242 Pu Plutonium	95 243 Am Americium	96 247 Cm Curium	97 247 Bk Berkélium	98 251 Cf Californium	99 254 Es Einsteinium	100 253 Fm Fermium	101 256 Md Mendelevium	102 254 No Nébulium	103 257 Lw Lawrencium

D'après la règle de Klechkowski, l'ordre de remplissage est :

$$1s^2 \rightarrow 2s^2 \rightarrow 2p^6 \rightarrow 3s^2 \rightarrow 3p^6 \rightarrow 4s^2 \rightarrow 3d^{10} \rightarrow 4p^6 \rightarrow 5s^2 \rightarrow 4d^{10} \rightarrow 5p^6 \rightarrow 6s^2 \rightarrow \text{etc.}$$

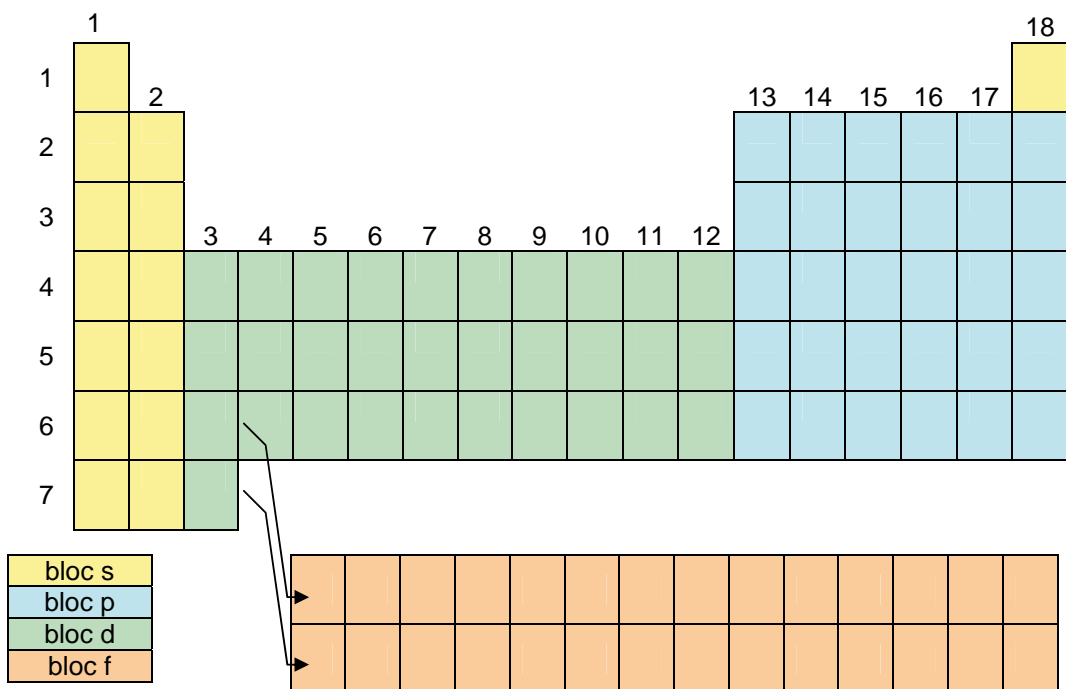
Ligne 1 Ligne 2 Ligne 3 Ligne 4 Ligne 5

On change de ligne lorsqu'une nouvelle orbitale s commence à se remplir.
 La première ligne contient ainsi 2 éléments de structure électronique $1s^1$ et $1s^2$.
 La deuxième ligne contient 8 éléments (2 + 6). Structure électronique du premier élément de cette ligne : [He] $2s^1$, du dernier élément : [He] $2s^2 2p^6$.

Remarque
 [He] désigne la configuration électronique de l'hélium, c'est-à-dire $1s^2$.

La troisième ligne contient 8 éléments (2 + 6).
 La quatrième ligne contient 18 éléments (2 + 10 + 6). Structure électronique du premier élément de cette ligne : [Ar] $4s^1$, du dernier élément : [Ar] $4s^2 3d^{10} 4p^6$.
 La cinquième ligne contient 18 éléments (2 + 10 + 6).
 Etc.

III – Détermination de la position d'un élément dans la classification périodique à 18 colonnes.



Il faut tout d'abord déterminer la formule électronique par orbitales de l'élément considéré.
 La ligne à laquelle appartient cet élément est donnée par le numéro de la dernière orbitale s qui apparaît dans la formule électronique.
 La colonne est donnée par le nombre d'électrons dans le dernier type d'orbitales (celui le plus à droite dans l'écriture de la formule électronique).

2 Exercices corrigés

Application 1

On considère les états quantiques (n ; ℓ ; m_ℓ et m_s), des électrons d'un atome de magnésium ($Z = 12$). Quelles sont les valeurs numériques de ces états quantiques pour un atome pris dans l'état fondamental ?

La structure électronique est : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$.

Rappelons que pour l'orbitale s, on a $\ell = 0$ et $m_\ell = 0$.

Pour les orbitales p, on a $\ell = 1$ et $m_\ell = -1$; 0 et 1.

Enfin, lorsque deux électrons sont dans une même orbitale, leurs nombres magnétiques de spin sont opposés.

On a donc les états quantiques suivants pour les 12 électrons du cortège électronique :

$\left(1; 0; 0; \frac{1}{2}\right)$; $\left(1; 0; 0; -\frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 0; 0; \frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 0; 0; -\frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 1; -1; \frac{1}{2}\right)$;
 $\left(2; 1; -1; -\frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 1; 0; \frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 1; 0; -\frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 1; 1; \frac{1}{2}\right)$; $\left(2; 1; 1; -\frac{1}{2}\right)$; $\left(3; 0; 0; \frac{1}{2}\right)$
 et $\left(3; 0; 0; -\frac{1}{2}\right)$.

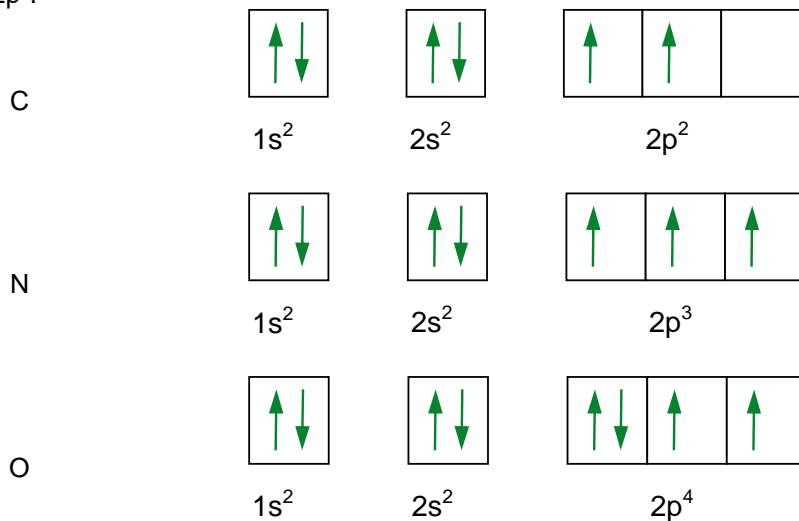
Application 2

Donner les formules électroniques par orbitales des atomes de carbone, d'azote et d'oxygène. Placer ces électrons dans des cases quantiques symbolisant les orbitales en appliquant la règle de Hund.

C ($Z = 6$) : $1s^2 2s^2 2p^2$ (ordre de remplissage donné par la règle de Klechkowski).

N ($Z = 7$) : $1s^2 2s^2 2p^3$.

O ($Z = 8$) : $1s^2 2s^2 2p^4$.



Application 3

Donner les formules électroniques des atomes de magnésium ($Z = 12$), de vanadium ($Z = 23$) et de brome ($Z = 35$). En déduire leurs positions dans le tableau périodique à 18 colonnes.

On applique la règle de Klechkowski donnant l'ordre de remplissage par orbitales.

Mg ($Z = 12$) : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$.

- Position : troisième ligne (numéro de la dernière orbitale s), deuxième colonne du bloc s (car il y a 2 électrons dans la dernière orbitale qui est de type s), il s'agit donc de la deuxième colonne du tableau périodique puisque le tableau commence par le bloc s.

V ($Z = 23$) : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^3$.

- Position : quatrième ligne (numéro de la dernière orbitale s), troisième colonne du bloc d (car il y a 3 électrons dans le dernier groupe d'orbitales qui est de type d), il s'agit donc de la cinquième colonne ($2 + 3$) du tableau périodique à 18 colonnes puisque le bloc d est juste après le bloc s.

Br ($Z = 35$) : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^5$.

- Position : quatrième ligne (numéro de la dernière orbitale s), cinquième colonne du bloc p (car il y a 5 électrons dans le dernier groupe d'orbitales qui est de type p), il s'agit donc de la dix-septième colonne ($2 + 10 + 5$) du tableau périodique à 18 colonnes puisque le bloc p est après les blocs s et d.

CHAPITRE 4 / TRANSFERTS D'ÉNERGIE, THÉORÈME DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE, COURANT ÉLECTRIQUE

1 Essentiel du cours

I – Les transferts d'énergie

Un corps pur, de masse m , reçoit une énergie E qui le fait passer d'une température initiale θ_i à une température finale θ_f **sans changement d'état physique** (c'est-à-dire que le corps reste solide s'il était initialement solide, reste liquide s'il était initialement liquide ou reste gazeux s'il était initialement gazeux). L'énergie apportée est alors proportionnelle à m et à la variation de température $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$.

$$E = m c \Delta\theta = m c (\theta_f - \theta_i)$$

E en (J) ; m en (kg) ; c en ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) ; θ en ($^\circ\text{C}$).

Le coefficient de proportion c est appelé capacité calorifique massique (ou chaleur massique du corps).

Remarque

Le produit $m c$ noté C est la capacité calorifique du corps en ($\text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

Un corps pur, de masse m , reçoit une énergie E qui le fait passer d'un état physique initial i à un état physique final f , **la température restant constante**. L'énergie apportée est alors proportionnelle à m .

$$E = m L_{i \rightarrow f}$$

E en (J) ; m en (kg) ; $L_{i \rightarrow f}$ en ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

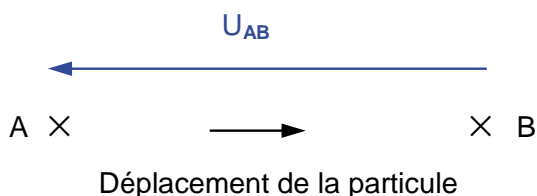
Le coefficient de proportion $L_{i \rightarrow f}$ est appelé chaleur latente massique du changement d'état physique $i \rightarrow f$ considéré (fusion, vaporisation, condensation, etc.).

La puissance P (en watts : W) reçue par un système est le rapport de l'énergie apportée (J) par la durée τ (en secondes : s) du transfert.

$$P = \frac{E}{\tau}$$

II – Le théorème de l'énergie cinétique (TEC)

La variation d'énergie cinétique d'une particule de charge algébrique q (>0 ou <0) se déplaçant de A vers B est égale au produit de la charge q par la tension entre le point initial A et le point final B.



$$\Delta E_{C_{A \rightarrow B}} = E_{C_B} - E_{C_A} = qU_{AB}$$

Les unités S.I. : E_{C_A} ; E_{C_B} ; ΔE_c en (J) ; q en (C) ; U_{AB} en (V).

Cas des particules relativistes : une particule est relativiste si son énergie cinétique est au moins égale au dixième de son énergie de masse au repos $E_0 = m_0 c^2$. Dans ce cas, l'énergie cinétique n'est plus égale à $\frac{1}{2}mv^2$ mais à $(\gamma - 1) E_0$ c'est-à-dire $(\gamma - 1) m_0 c^2$.

$$\text{Avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (\text{en posant } \beta = \frac{v}{c})$$

v : vitesse de la particule ($m \cdot s^{-1}$) ; $c = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$.

III – Le courant électrique

L'intensité d'un courant est la valeur absolue de la charge électrique qui traverse une section de circuit pendant une seconde.

$$I = \frac{|Q|}{\tau} = \frac{Ne}{\tau}$$

N représente le nombre d'électrons traversant une section de circuit en τ secondes ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ est la charge (en valeur absolue) portée par un électron.

Les unités S.I. : I en ampères (A) ; Q (C) ; τ (s).

Lorsqu'un courant est alternatif sinusoïdal, on peut le mettre sous la forme : $i(t) = I_m \cos(\omega t)$.

$i(t)$ représente la valeur instantanée (A) ; I_m est l'amplitude ou valeur maximale (A) ; ω est la pulsation ($rad \cdot s^{-1}$) ; t est la date (s).

La pulsation est liée à la période par la relation : $T = \frac{2\pi}{\omega}$. (T en secondes).

La fréquence est l'inverse de la période : $f = \frac{1}{T}$. (f en s^{-1} qu'on appelle hertz : Hz).

L'intensité efficace correspond à la valeur du courant continu qui produirait le même effet thermique dans une résistance. Dans le cas d'un courant sinusoïdal, elle est donnée par la relation

$$I_{\text{eff}} (\text{ou } I) = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

La valeur moyenne notée $\langle I \rangle$ est obtenue par un calcul d'intégrale :

$$\langle I \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \cos(\omega t) dt ; \langle I \rangle = \frac{I_m}{T} \int_0^T \cos(\omega t) dt = \frac{I_m}{T} \left[\frac{1}{\omega} \sin(\omega t) \right]_0^T$$

$$\langle I \rangle = \frac{I_m}{\omega T} \left(\underbrace{\sin(\omega T)}_{=0} - \underbrace{\sin 0}_{=0} \right) = 0.$$

L'intensité moyenne est bien sûr nulle car le courant est alternatif.

On peut également déterminer l'intensité moyenne par méthode graphique.

2 Exercices corrigés

Données pour tous les exercices :

Capacité calorifique massique de l'eau : $c_e = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; capacité calorifique massique de la vapeur d'eau : $c_v = 2,01 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; chaleur latente massique de vaporisation de l'eau : $L_v = 2,26 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Application 1

Quelle est l'énergie transférée à 10 g d'eau lorsque sa température passe de 20 °C à 40 °C ?
Quelle est la puissance reçue par l'eau si l'opération dure 5 s ?

$$E = m c \Delta\theta = 0,010 \cdot 4,18 \cdot 10^3 (40 - 20) = 836 \text{ J.}$$

$$P = \frac{E}{\tau} = \frac{836}{5} = 167,2 \text{ W.}$$

Application 2

Quelle est l'énergie nécessaire pour transformer 15 g d'eau liquide initialement à 20 °C en vapeur d'eau à 140 °C ?

Le calcul se fait en trois étapes :

• première étape : on porte les 15 g d'eau de $\theta_1 = 20 \text{ °C}$ à $\theta_2 = 100 \text{ °C}$ sans changement d'état physique.

$$E_1 = m c_e (\theta_2 - \theta_1) = 0,015 \cdot 4,18 \cdot 10^3 (100 - 20) = 5\,016 \text{ J.}$$

• deuxième étape : on transforme les 15 g d'eau en vapeur d'eau à température constante ($\theta_2 = 100 \text{ °C}$).

$$E_2 = m L_v = 0,015 \cdot 2,26 \cdot 10^6 = 33\,900 \text{ J.}$$

• troisième étape : on porte les 15 g de vapeur d'eau de $\theta_2 = 100 \text{ °C}$ à $\theta_3 = 140 \text{ °C}$ sans changement d'état physique.

$$E_3 = m c_v (\theta_3 - \theta_2) = 0,015 \cdot 2,01 \cdot 10^3 (140 - 100) = 1\,206 \text{ J.}$$

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 40\,122 \text{ J.}$$

Application 3

Dans un tube à rayons X, les électrons émis à la cathode (C) avec une vitesse négligeable sont accélérés par une tension $U_{AC} = 20 \text{ kV}$ appliquée entre l'anode (A) et la cathode. Dans le cadre de la mécanique classique, calculer la vitesse des électrons lorsqu'ils viennent frapper l'anode. Montrer que pour une tension accélératrice de 100 kV, les électrons sont relativistes. Calculer alors leur vitesse.

On applique le TEC à un électron se déplaçant de C vers A.

$$\Delta E_{C \rightarrow A} = E_{c_A} - \underbrace{E_{c_C}}_{=0} = q U_{CA} = -e U_{CA} = e U_{AC}$$

Or $E_{c_A} = \frac{1}{2} m v_A^2$, par conséquent :

$$v_A = \sqrt{\frac{2 E_{c_A}}{m}} = \sqrt{\frac{2 e U_{AC}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 20 \cdot 10^3}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 8,4 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}.$$

Pour une tension de 100 kV, l'énergie cinétique acquise par les électrons est :

$$E_{c_A} = e U_{AC} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 10^3 = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 100 \text{ keV.}$$

$$E_o = m_o c^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 512 \text{ keV.}$$

$$\frac{E_{c_A}}{E_o} = \frac{1,6 \cdot 10^{-14}}{8,19 \cdot 10^{-14}} = 0,20 ; E_{c_A} > 0,1 E_o, \text{ l'électron est relativiste. On a alors } E_{c_A} = (\gamma - 1) E_o.$$

$$\text{D'où } \gamma - 1 = \frac{E_{c_A}}{E_o} \text{ et donc } \gamma = 1 + \frac{E_{c_A}}{E_o} = 1,20 ; \text{ or } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} ; \text{ d'où } \gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2} \text{ et } 1 - \beta^2 = \frac{1}{\gamma^2}.$$

$$1 - \frac{1}{\gamma^2} = \beta^2 \text{ et donc } \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,55 ; v = \beta c = 1,66 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

Application 4

Un proton est accéléré entre les points A et B par une tension U_{AB} . Donner le signe et la valeur de U_{AB} pour que la vitesse du proton passe de $v_A = 1,7 \cdot 10^5 \text{ m.s}^{-1}$ à $v_B = 3,2 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$.

On applique le TEC pour le déplacement de A vers B du proton.

$$\Delta E_{c_{A \rightarrow B}} = E_{c_B} - E_{c_A} = q U_{AB} = e U_{AB} ;$$

$$U_{AB} = \frac{E_{c_B} - E_{c_A}}{e} = \frac{\frac{1}{2} m_p (v_B^2 - v_A^2)}{e} = \frac{\frac{1}{2} 1,67 \cdot 10^{-27} [(3,2 \cdot 10^6)^2 - (1,7 \cdot 10^5)^2]}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 53289 \text{ V} .$$

La tension est positive.

Application 5

Quel est le débit électronique $D = \frac{N}{\tau}$ à travers un conducteur parcouru par un courant d'intensité 2 A ?

$$I = \frac{|Q|}{\tau} = \frac{Ne}{\tau} = D e ; D = \frac{I}{e} = \frac{2}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,25 \cdot 10^{19} \text{ électrons par seconde} .$$

Application 6

$N = 5 \cdot 10^{20}$ électrons traversent une section de conducteur en $\tau = 10 \text{ s}$. Quelle est l'intensité du courant à travers le circuit ?

$$I = \frac{|Q|}{\tau} = \frac{Ne}{\tau} = \frac{5 \cdot 10^{20} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{10} = 8 \text{ A} .$$

Application 7

Quelles sont les amplitude, pulsation, période, fréquence et valeur efficace du courant alternatif sinusoïdal $i(t) = 0,200 \cos(100 \pi t)$?

Rappelons que l'expression de l'intensité instantanée est : $i(t) = I_m \cos(\omega t)$, on obtient par identification :

$$I_m = 0,200 \text{ A} = 200 \text{ mA} \text{ et } \omega = (100 \pi) \text{ rad.s}^{-1} \approx 314 \text{ rad.s}^{-1} .$$

$$T = \frac{2 \pi}{\omega} = \frac{2 \pi}{100 \pi} = 0,020 \text{ s} = 20 \text{ ms} ; f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Hz} ; I_{\text{eff}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{200}{\sqrt{2}} = 141 \text{ mA} .$$

CHAPITRE 5 / PRINCIPE DU LASER

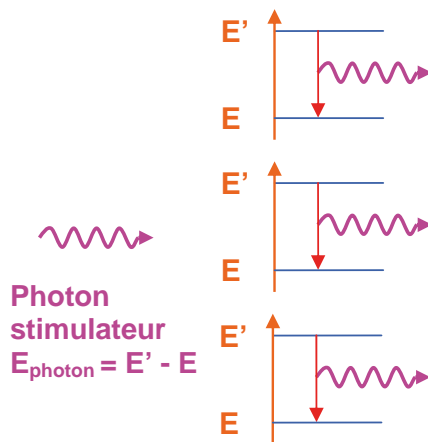
1 Essentiel du cours

I – Émission stimulée

Dans un laser, la production de photons se fait par émission stimulée et non par émission spontanée comme c'est le cas pour une lampe à gaz ou à vapeur métallique.

Si des atomes peuvent rester suffisamment longtemps dans un état excité E' (niveau métastable à longue durée de vie) alors leurs désexcitations sont déclenchées (stimulées) par un photon dont l'énergie est exactement égale à l'énergie de la transition $E' \rightarrow E$ (E étant l'énergie du niveau fondamental) ; on obtient alors par désexcitations, des photons identiques émis dans la même direction (cohérence spatiale) et dont les ondes associées ont la même phase (cohérence temporelle).

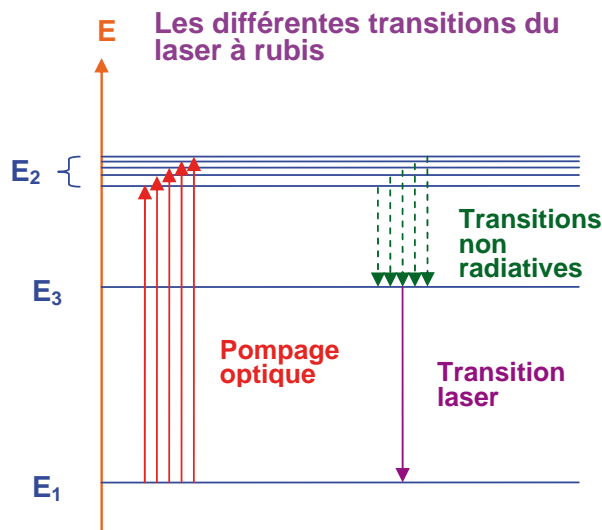
Émission stimulée d'un grand nombre d'atomes par un photon



Le pompage optique consiste à fournir de l'énergie aux atomes du milieu actif pour les faire accéder à des états excités. Ce processus est à l'origine d'une inversion de population (les atomes, initialement au niveau fondamental E sont à présent au niveau excité E' à longue durée de vie). Dans ces conditions, l'émission laser est déclenchée par un photon d'énergie $E' - E$.

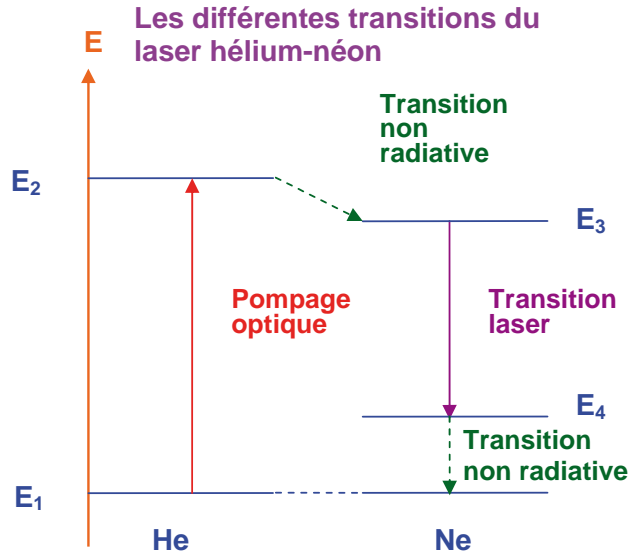
II – Exemples de lasers

Le laser à rubis (laser à 3 niveaux).



$E_1 \rightarrow E_2$: pompage optique (E_2 est une bande d'énergie constituée d'un grand nombre de niveaux très proches).
 $E_2 \rightarrow E_3$: transitions non radiatives (transfert d'énergie par chaleur). E_3 est le niveau d'inversion de population à longue durée de vie.
 $E_3 \rightarrow E_1$: transition laser déclenchée par un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_3 - E_1$.

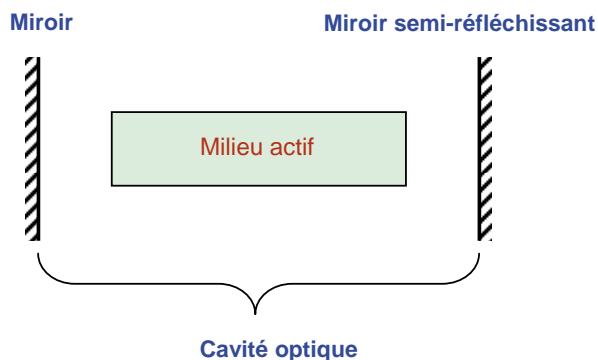
Le laser Hélium-Néon (laser à 4 niveaux).



$E_1 \rightarrow E_2$: pompage optique des atomes d'hélium.
 $E_2 \rightarrow E_3$: transition non radiative. Les atomes d'hélium au niveau E_2 transfèrent leur énergie aux atomes de néon qui accèdent ainsi au niveau E_3 . La différence d'énergie $E_2 - E_3$ est convertie en chaleur.
 $E_3 \rightarrow E_4$: transition laser déclenchée par un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_3 - E_4$.
 $E_4 \rightarrow E_1$: transition non radiative (chaleur).

III – La cavité résonante

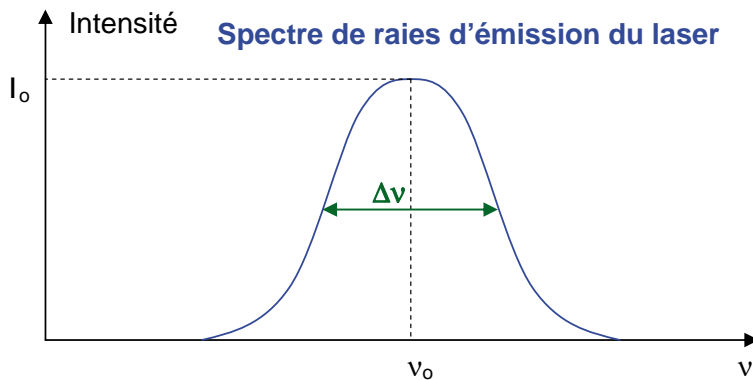
Le milieu actif est placé dans une cavité résonante limitée par 2 miroirs plans dont l'un est semi-réfléchissant pour permettre à une partie des photons de sortir.



L'amplification de lumière a lieu si la longueur L de la cavité résonante est un multiple entier de la demi-longueur d'onde des photons (interférences constructives).

$$L = k \frac{\lambda}{2}$$

L'émission laser n'est pas rigoureusement monochromatique. La courbe de l'intensité émise en fonction de la fréquence présente l'allure d'une courbe de Gauss (le niveau d'inversion de population est en fait une bande d'énergie constituée d'un grand nombre de niveaux très proches).



$\Delta\nu$ est la largeur de raie (largeur du pic au point d'abscisse $I = \frac{I_0}{2}$).

Par ailleurs, la cavité résonante sélectionne les fréquences ν qui donnent lieu à des interférences constructives, elles sont telles que :

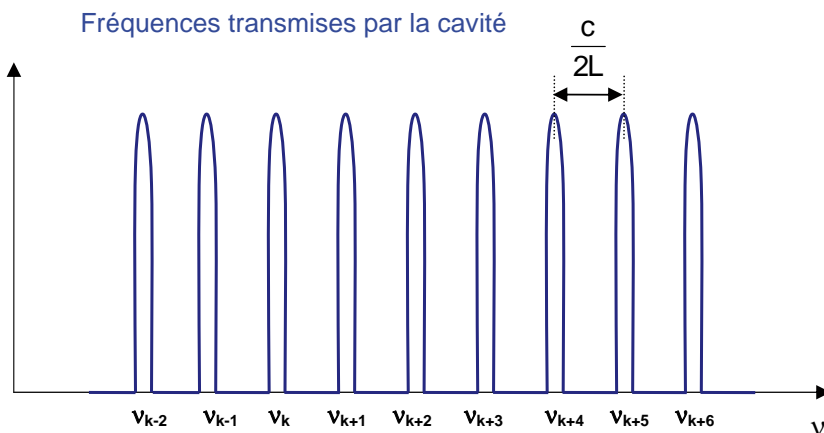
$$L = k \frac{\lambda}{2} = k \frac{c}{2\nu} \quad \left(\lambda = \frac{c}{\nu} \right)$$

$$\text{soit } \nu = k \frac{c}{2L}$$

La différence entre deux fréquences transmises successives est :

$$\nu_{k+1} - \nu_k = (k+1) \frac{c}{2L} - k \frac{c}{2L} = \frac{c}{2L}$$

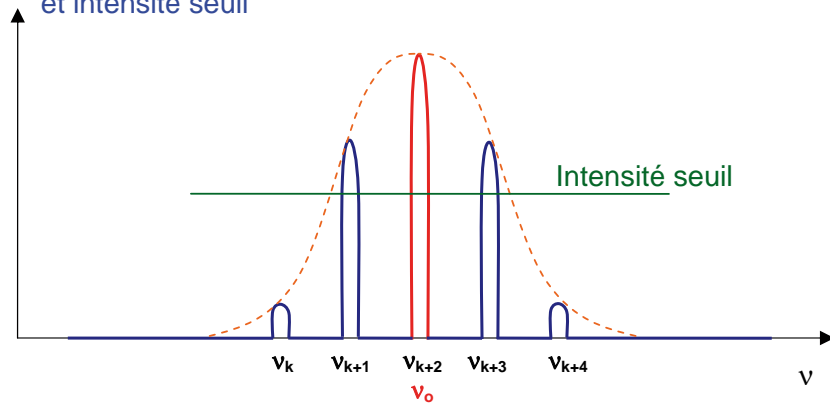
On a donc une succession de pics de fréquence distants de $\frac{c}{2L}$.



La superposition des deux courbes précédentes fournit les fréquences transmises ainsi que leurs intensités relatives.

Dans la pratique, seules les fréquences ayant une intensité supérieure à une valeur seuil sont transmises.

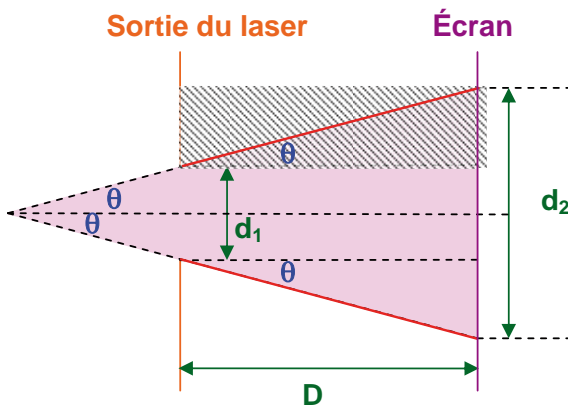
Intensités relatives des fréquences transmises par la cavité et intensité seuil



Le laser est monomode si une seule fréquence est transmise, dans le cas contraire, il est multimode.

IV – Divergence d'un laser

Les rayons d'un faisceau laser sont quasiment parallèles (on dit que le faisceau est directif). Il diverge néanmoins de quelques milliradians (mrad).



θ : demi-angle au sommet du cône.
 d_1 : diamètre du faisceau laser à la sortie.
 d_2 : diamètre du disque lumineux sur l'écran.
 D : distance entre la sortie du laser et l'écran.

L'angle de divergence est $\alpha = 2 \theta$; l'angle θ est tel que (triangle hachuré) :

$$\tan \theta = \frac{\frac{d_2}{2} - \frac{d_1}{2}}{D} = \frac{d_2 - d_1}{2D} \approx \theta \text{ (rad)}$$

2 Exercices corrigés

Application 1

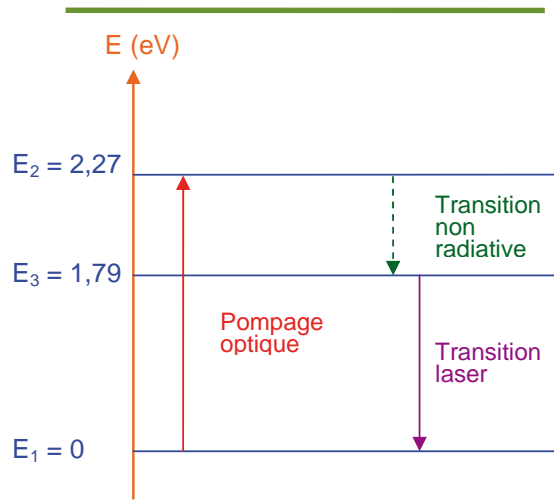
Le laser à rubis fonctionne sur trois niveaux : E_1 , E_2 et E_3 . Si l'on place l'origine des énergies sur le niveau E_1 , alors on obtient la valeur 2,27 eV (environ) pour le niveau E_2 et 1,79 eV pour E_3 .

Faire le diagramme énergétique du laser et représenter par des flèches la transition de pompage optique, la transition de transfert non radiatif d'énergie et la transition laser.

Le pompage optique est réalisé par un flash lumineux, quelle est la longueur d'onde du rayonnement utile correspondant ?

Calculer la longueur d'onde de l'émission laser ? Dans quel domaine des radiations électromagnétiques s'effectue-t-elle ?

Expliquer les raisons pour lesquelles le fonctionnement d'un laser s'accompagne d'une forte libération d'énergie sous forme de chaleur ?



$$E_{\text{pompage optique}} = E_2 - E_1 = E_2 = \frac{hc}{\lambda} ; \lambda = \frac{hc}{E_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,27 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,47 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 547 \text{ nm} .$$

$$E_{\text{laser}} = E_3 - E_1 = E_3 = \frac{hc}{\lambda} ; \lambda = \frac{hc}{E_3} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,79 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,93 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 693 \text{ nm} .$$

Ce rayonnement est visible (compris entre 400 et 800 nm), de couleur rouge.

À la suite du pompage optique, il se produit immédiatement une transition non radiative d'énergie $2,27 - 1,79 = 0,48$ eV vers le niveau métastable E_3 . Il y a donc libération d'énergie sous forme de chaleur.

Application 2

Un laser Hélium-Néon de puissance $P = 2$ mW émet un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 632,8$ nm. Ce rayonnement est-il visible ? Si oui, quelle est sa couleur ?

Quelle est l'énergie des photons produits ?

Quel est le nombre de photons émis par seconde ?

Le rayonnement est visible (compris entre 400 et 800 nm), sa couleur est rouge.

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{632,8 \cdot 10^{-9}} = 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,96 \text{ eV} .$$

$$P = \frac{E_{\text{émise}}}{\tau} = \frac{NE_{1\text{photon}}}{\tau} ; \frac{N}{\tau} = \frac{P}{E_{1\text{photon}}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 10^{-19}} = 6,37 \cdot 10^{15} \text{ photons par seconde} .$$

Application 3

En chirurgie, on utilise, en tant que bistouri, un laser à CO_2 de puissance 20 W et de longueur d'onde $10,6 \mu\text{m}$. Ce dispositif est toujours associé à un laser He-Ne qui émet un faisceau de couleur rouge confondu avec celui du bistouri.

Dans quel domaine des ondes électromagnétiques le laser à CO₂ émet-il ? Pourquoi est-il nécessaire de lui adjoindre un laser He-Ne ?

Calculer l'énergie d'un photon de longueur d'onde 10,6 μm ainsi que le nombre de photons émis en une seconde.

Quelle est l'énergie transférée aux tissus en une seconde ? Quel volume de tissu (assimilable à de l'eau) est vaporisé en une seconde sachant qu'il faut une énergie de 2,5 J pour vaporiser 1 mm³ d'eau.

Le bistouri est déplacé sur la peau à la vitesse de 1 cm.s⁻¹. Quelle est, dans ces conditions, la profondeur de coupe sachant que la largeur de faisceau est de 0,2 mm ?

Le laser à CO₂ émet dans l'infrarouge, le laser He-Ne sert à visualiser le faisceau actif du bistouri qui est invisible.

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10,6 \cdot 10^{-6}} = 1,87 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,117 \text{ eV}.$$

$$P = \frac{E_{\text{émise}}}{\tau} = \frac{NE_{1\text{photon}}}{\tau}; \quad \frac{N}{\tau} = \frac{P}{E_{1\text{photon}}} = \frac{20}{1,87 \cdot 10^{-20}} = 1,07 \cdot 10^{21} \text{ photons par seconde.}$$

$$E_{\text{transférée}} = P \tau = 20 \cdot 1 = 20 \text{ J.}$$

$$V_{\text{vaporisé}} = \frac{20}{2,5} = 8 \text{ mm}^3.$$

La surface balayée par le laser en une seconde est quasiment rectangulaire de surface S (mm²) = L ℓ = 10,0,2 = 2 mm².

$$\text{D'où la profondeur de coupe } P = \frac{V}{S} = \frac{8}{2} = 4 \text{ mm}.$$

Application 4

Un laser He-Ne dont la cavité résonante vaut L = 18 cm émet des photons de longueur d'onde λ₀ = 632,8 nm. Sa largeur de raie est Δν = 1 GHz.

Quelle est la fréquence correspondant à cette émission ?

Calculer la différence entre deux fréquences successives émises par ce laser.

Ce laser peut-il avoir d'autres fréquences d'émission que celle correspondant à la valeur centrale ? Autrement dit est-il monomode ou multimode ?

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{632,8 \cdot 10^{-9}} = 4,74 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 474000 \text{ GHz}.$$

$$\nu_1 - \nu_0 = \frac{c}{2L} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 0,18} = 8,33 \cdot 10^8 \text{ Hz} = 0,83 \text{ GHz}.$$

De part et d'autre de ν₀, on a une demi-largeur de raie $\frac{\Delta\nu}{2} = 0,5 \text{ GHz}$, les fréquences ν₋₁ et ν₁ sont donc à l'extérieur de la courbe de Gauss puisqu'elles apparaissent respectivement 0,83 GHz avant et après ν₀. Le laser est ainsi monomode.

Application 5

Un laser à rubis présente une divergence de 2 mrad. Le diamètre du faisceau à la sortie du laser est de 0,5 mm. Quel est le diamètre observé sur un écran placé à 10 m de la sortie du laser ?

$$\tan \theta = \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{d_2 - d_1}{2D}; \quad d_2 - d_1 = 2D \cdot \tan \frac{\alpha}{2};$$

$$d_2 = d_1 + 2D \cdot \tan \frac{\alpha}{2} = 0,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot \tan \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,0205 \text{ m} = 2,05 \text{ cm}.$$

CHAPITRE 6 / SPECTROSCOPIE X

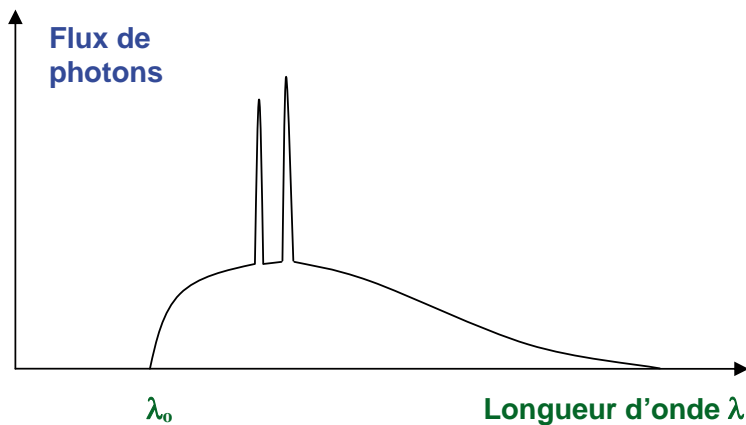
1 Essentiel du cours

I – Généralités sur la production de rayons X

Le physicien allemand Röntgen mit en évidence l'émission d'un rayonnement inconnu, qu'il baptisa rayons X, par un tube de Crookes (ampoule de verre contenant de l'air sous pression réduite et munie de deux électrodes : l'anode et la cathode) soumis à une très haute tension (de l'ordre de 100 kV). Ce tube fut amélioré par le physicien américain Coolidge qui rajouta, au voisinage de la cathode, un filament émettant des électrons par effet thermoélectronique. Par ailleurs, dans un tube de ce type, le vide y est très poussé pour éviter au maximum les interactions entre les électrons et les molécules d'air.

II – Spectre d'émission X

Il se compose d'un spectre continu sur lequel apparaissent 2 ou 4 raies.



Le flux de photons est le nombre de photons émis par seconde.

- Le spectre continu est dû à la décélération des électrons dans la cible (anode), on l'appelle le rayonnement de freinage ou *bremssstrahlung* (traduction en allemand). En effet, d'après les lois de Maxwell sur l'électromagnétisme, lorsqu'une particule chargée est déviée de sa trajectoire rectiligne (ce qui est le cas lorsqu'elle interagit avec le noyau chargé positivement), elle rayonne de l'énergie, l'énergie rayonnante (tout ou une partie de l'énergie des électrons incidents) étant prélevée sur l'énergie cinétique de la particule qui est ainsi ralentie voire arrêtée.

Le spectre continu est limité à gauche par la longueur d'onde limite λ_0 ; ces photons X extrêmes ont une énergie maximale (toute l'énergie cinétique des électrons $E_c = e U_{AC}$ est convertie en énergie rayonnante).

Pour ces photons d'énergie maximale, on a $E_{\text{photon}} = \frac{h c}{\lambda_0} = e U_{AC}$, c'est-à-dire $\lambda_0 = \frac{h c}{e U_{AC}}$.

La fréquence limite du rayonnement de freinage est : $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{\frac{h c}{e U_{AC}}} = \frac{e U_{AC}}{h}$.

Le spectre continu présente son maximum au point d'abscisse $\lambda \approx 1,5 \lambda_0$.

- Le spectre de raies est le spectre caractéristique dû à l'extraction d'un électron profond (K ou L) d'un atome de la cible à la suite d'un choc avec un électron projectile. Il s'ensuit une réorganisation électronique ; l'électron arraché est remplacé par un électron d'une couche supérieure, lui-même remplacé par un électron d'une couche encore supérieure et ainsi de suite. À chaque transition d'un

électron d'une couche supérieure vers une couche inférieure, il y a émission d'un photon visible ou invisible notamment dans le domaine des rayons X.

La série K correspond aux transitions aboutissant au niveau K.

K_α est la première transition de cette série (L \rightarrow K ou 2 \rightarrow 1).

K_β est la deuxième transition (M \rightarrow K ou 3 \rightarrow 1).

K_γ est la troisième transition (N \rightarrow K ou 4 \rightarrow 1) et ainsi de suite.

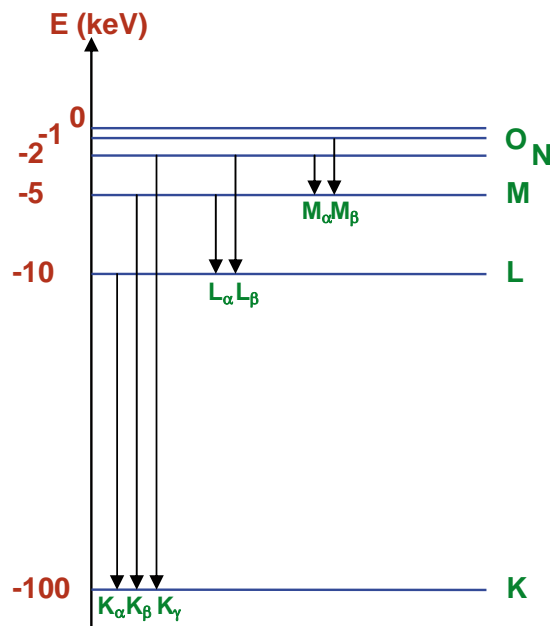
La série L correspond aux transitions aboutissant au niveau L.

L_α (M \rightarrow L ou 3 \rightarrow 2).

L_β (N \rightarrow L ou 4 \rightarrow 2).

L_γ (O \rightarrow L ou 5 \rightarrow 2).

Et ainsi de suite.



Remarque

Les valeurs indiquées en ordonnée sont des ordres de grandeur qui varient selon les atomes.

III – Rendement et caractéristiques d'un tube de Coolidge

La plus grande partie de l'énergie des électrons incidents est convertie en chaleur.

Le rendement r de quelques % est donné par la relation :
$$r = \frac{P_{\text{rayonnée}}}{P_{\text{consommée}}} = K Z U .$$

K : coefficient qui dépend de la forme de l'anode.

Z : numéro atomique de l'anode.

U : tension accélératrice.

Lorsque U_{AC} augmente, $E_{x_{\max}}$ augmente mais ϕ (flux de photons) reste constant.

Si N (nombre d'électrons arrivant à l'anode) augmente, ϕ augmente mais $E_{x_{\max}}$ reste constant.

Si Z (numéro atomique de l'anode) augmente, ϕ augmente mais $E_{x_{\max}}$ reste constant.

2 Exercices corrigés

Application 1

Quelle est la limite en longueur d'onde d'un tube à rayons X soumis à une tension de 50 kV ? Calculer l'énergie des photons les plus nombreux.

$$\lambda_o = \frac{hc}{e U_{AC}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 50 \cdot 10^3} = 2,48 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,25 \text{ \AA}.$$

Les photons les plus nombreux ont une longueur d'onde $\lambda = 1,5 \lambda_o$, l'énergie correspondante est : $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{1,5 \lambda_o} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,5 \cdot 2,48 \cdot 10^{-11}} = 5,34 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 33,4 \text{ keV}.$

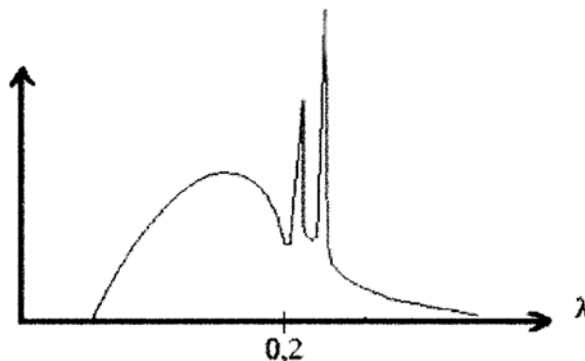
Application 2

Pour produire des rayons X de longueur d'onde égale à 0,1 nm, quelle tension minimale doit-on utiliser pour accélérer les électrons ?

$$E_X = e U_{AC_{\text{mini}}} = \frac{hc}{\lambda}; U_{AC_{\text{mini}}} = \frac{hc}{e \lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1 \cdot 10^{-9}} = 12412,5 \text{ V}$$

Application 3

Un tube à rayon X a une anode (encore appelée anticathode) en chrome. Le spectre d'émission X est représenté ci-dessous.



On donne : $\lambda_{Cr_{K\beta}} = 0,209 \text{ nm}$, $\lambda_{Cr_{K\alpha}} = 0,229 \text{ nm}$ et $\lambda_o = 0,062 \text{ nm}$. $R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$.

- 1) À quoi est due l'émission du rayonnement X polychromatique (fond continu) ?
- 2) À quoi est due l'émission du rayonnement X monochromatique (raies K_α et K_β) ?
- 3) Représenter par 2 flèches sur un schéma énergétique les transitions électroniques correspondant à l'émission des 2 raies K_α et K_β .
- 4) Si $\lambda_o = 0,062 \text{ nm}$, quelle est (en J et en eV) l'énergie cinétique des électrons arrivant sur l'anode ?
- 5) Quelle est alors la tension de fonctionnement du tube ?
- 6) La loi de Moseley donnant la fréquence d'émission des photons K_α en fonction du numéro atomique Z du métal de l'anode s'écrit : $\sqrt{\nu} = A (Z - B)$.

Par identification avec la relation de Rydberg : $\frac{1}{\lambda_{n \rightarrow p}} = R_H (Z - B)^2 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.

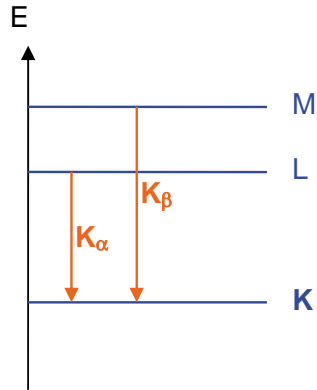
Avec B : constante d'écran de la couche K ; p : niveau d'arrivée ; n : niveau de départ.

Calculer la constante A pour les raies K_α .

- 7) Pour le chrome : $Z = 24$ et $\lambda_{K_\alpha} = 0,229 \text{ nm}$, calculer la valeur de la constante B .

- 1) Le fond continu constitue le rayonnement de freinage (ou *bremstrahlung*).
- 2) Le spectre de raies est le spectre caractéristique dû à l'extraction d'un électron K suivi d'une réorganisation électronique.

3)



$$4) E_{\text{électron}} = E_{X_{\text{max}}} = \frac{hc}{\lambda_o} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,062 \cdot 10^{-9}} = 3,20 \cdot 10^{-15} \text{ J} \approx 20 \text{ keV}.$$

$$5) E_{\text{électron}} = e U_{AC}; U_{AC} = \frac{E_{\text{électron}}}{e} = \frac{3,2 \cdot 10^{-15}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 20 \text{ kV}.$$

$$6) \sqrt{v} = \sqrt{\frac{c}{\lambda_{n \rightarrow p}}} = A(Z - B); \text{ et d'après la loi de Rydberg : } \sqrt{\frac{c}{\lambda_{n \rightarrow p}}} = \sqrt{c R_H \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)} (Z - B).$$

La raie K_{α} correspond à la transition $2 \rightarrow 1$ ($n = 2$ et $p = 1$).

$$\text{Par identification : } A = \sqrt{c R_H \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)} = \sqrt{3 \cdot 10^8 \cdot 1,097 \cdot 10^7 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)} = 4,97 \cdot 10^7 \text{ uSI}.$$

$$7) \sqrt{v} = \sqrt{\frac{c}{\lambda_{n \rightarrow p}}} = A(Z - B); Z - B = \frac{\sqrt{\frac{c}{\lambda_{n \rightarrow p}}}}{A};$$

$$B = Z - \frac{\sqrt{\frac{c}{\lambda_{n \rightarrow p}}}}{A} = 24 - \frac{\sqrt{\frac{3 \cdot 10^8}{0,229 \cdot 10^{-9}}}}{4,97 \cdot 10^7} \approx 1.$$

Application 4

On établit entre l'anode et la cathode d'un tube de Coolidge une différence de potentiel de 40 kV. La vitesse avec laquelle un électron quitte la cathode est négligée.

1) Calculer la longueur d'onde seuil des rayons X émis.

2) L'anode ne porte pas de système de refroidissement et elle ne doit pas supporter une élévation de température supérieure à 800 °C lorsqu'elle fonctionne. On évalue à 2 % l'énergie rayonnée par les rayons X ; le courant traversant le tube est $I = 30 \text{ mA}$. Calculer la puissance Joule transférée à l'anode et la durée maximale de fonctionnement sachant que la capacité thermique C (c'est-à-dire le produit $m c$) de l'anode est $15,05 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$.

3) La durée de fonctionnement du tube n'est plus limitée. L'anode est refroidie par circulation d'eau. Quel est le débit d'eau en litres par heure pour que l'élévation de température de l'eau après passage dans l'anode ne dépasse pas 50 °C ? On calculera tout d'abord la chaleur véhiculée par un litre d'eau lorsqu'elle passe de la température θ à $\theta + 50 \text{ °C}$ puis la chaleur dégagée par le tube en une heure. (Chaleur massique de l'eau : $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$).

$$1) \lambda_o = \frac{hc}{e U_{AC}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 40 \cdot 10^3} = 3,10 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,31 \text{ \AA}.$$

$$2) P_{\text{joule}} = \frac{98}{100} P_{\text{consommée}} = \frac{98}{100} U I = \frac{98}{100} 40 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 1176 \text{ J}.$$

$$E_{\text{joule}} = P_{\text{joule}} \tau = m c \Delta\theta ; \tau = \frac{m c \Delta\theta}{P_{\text{joule}}} = \frac{15,05.800}{1176} = 10,2 \text{ s}.$$

3) Chaleur véhiculée par un litre d'eau (de masse 1 kg) lorsqu'elle passe de la température θ à $\theta + 50 \text{ }^\circ\text{C}$: $E_1 = m c \Delta\theta = 1,4,18.10^3.50 = 209\,000 \text{ J}$.

Chaleur dégagée par le tube en une heure : $E_2 = E_{\text{joule}} \cdot \tau = 1176.3600 = 4\,233\,600 \text{ J}$.

Le débit s'obtient en faisant le rapport $\frac{E_2}{E_1}$; $D = \frac{4233600}{209000} = 20,26 \text{ L.h}^{-1}$.

Application 5

Un tube de Coolidge à anode en tungstène est soumis à une tension $U_{AC} = 80 \text{ kV}$; il est dans ces conditions traversé par un courant d'intensité $I = 5 \text{ mA}$. Le rendement du tube est de 1 %.

1) Calculer la puissance consommée par le tube, la puissance rayonnée et la puissance Joule transférée à l'anode.

2) La température de fusion du tungstène est $\theta_f = 3\,400 \text{ }^\circ\text{C}$. Quelle est la durée maximum de fonctionnement du tube initialement à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ avant détérioration sachant que l'anode a une masse de 50 g. (Capacité calorifique massique du tungstène $c_W = 0,14 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

3) L'anode est à présent refroidie par circulation d'eau avec un débit de 15 litres par heure. Quelle est la température de l'eau à la sortie sachant qu'à l'entrée, elle est à $25 \text{ }^\circ\text{C}$? (Capacité calorifique massique de l'eau $c_e = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, masse volumique de l'eau $\mu = 1 \text{ kg.L}^{-1}$).

4) Quelle est l'énergie cinétique en joules et en électronvolts des électrons arrivant sur l'anode ?

5) Certains électrons produisent un rayonnement de freinage dont le spectre est continu, calculer la limite en longueur d'onde de ce spectre.

6) D'autres électrons arrachent un électron de la couche K du tungstène, il se produit alors une émission de photons de fluorescence à l'origine d'un spectre de raies.

Quelles sont les longueurs d'onde des raies K_α et K_β de ce spectre ?

On donne les énergies des trois premiers niveaux du tungstène : $E_K = -73 \text{ keV}$; $E_L = -19 \text{ keV}$; $E_M = -9 \text{ keV}$.

$$1) P_{\text{consommée}} = U I = 80.10^3.5.10^{-3} = 400 \text{ W}.$$

$$P_{\text{rayonnée}} = \frac{1}{100} P_{\text{consommée}} = \frac{1}{100} 400 = 4 \text{ W}.$$

$$P_{\text{joule}} = P_{\text{consommée}} - P_{\text{rayonnée}} = 396 \text{ W}.$$

$$2) E_{\text{joule}} = P_{\text{joule}} \tau = m c \Delta\theta ; \tau = \frac{m c \Delta\theta}{P_{\text{joule}}} = \frac{0,05.0,14.10^3.(3400 - 25)}{396} = 59,7 \text{ s}.$$

$$3) \text{Chaleur libérée par le tube en 1 heure : } E_1 = P_{\text{joule}} \tau = 396.3600 = 1\,425\,600 \text{ J}.$$

Cette chaleur est transférée à l'eau, on a donc : $E_1 = m c (\theta_{\text{final}} - \theta_{\text{initial}})$

$$\theta_{\text{final}} - \theta_{\text{initial}} = \frac{E_1}{m c} ; \theta_{\text{final}} = \theta_{\text{initial}} + \frac{E_1}{m c} = 25 + \frac{1425600}{15.4,18.10^3} = 47,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$4) E_{\text{c'électron}} = e U_{AC} = 1,6.10^{-19}.80.10^3 = 1,28.10^{-14} \text{ J} = 80 \text{ keV}.$$

$$5) \lambda_o = \frac{h c}{e U_{AC}} = \frac{6,62.10^{-34}.3.10^8}{1,6.10^{-19}.80.10^3} = 1,55.10^{-11} \text{ m} = 0,16 \text{ }^\circ\text{A}.$$

$$6) \lambda_{K_\alpha} = \frac{h c}{E_{K_\alpha}} = \frac{h c}{E_L - E_K} = \frac{6,62.10^{-34}.3.10^8}{(-19 - (-73)).1,6.10^{-16}} = 2,30.10^{-11} \text{ m} = 0,23 \text{ }^\circ\text{A}.$$

$$\lambda_{K_\beta} = \frac{h c}{E_{K_\beta}} = \frac{h c}{E_M - E_K} = \frac{6,62.10^{-34}.3.10^8}{(-9 - (-73)).1,6.10^{-16}} = 1,94.10^{-11} \text{ m} = 0,19 \text{ }^\circ\text{A}.$$

CHAPITRE 7 / RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE

1 Essentiel du cours

I – Moment magnétique, moment cinétique et spin nucléaire

• Le moment magnétique de spin $\vec{\mu}_s$ d'un noyau en rotation (qui traduit l'aimantation de ce noyau) est proportionnel à une grandeur quantique appelée moment cinétique de spin \vec{S} : $\vec{\mu}_s = \gamma \vec{S}$.

$\gamma = g \frac{q}{2m}$ est le rapport gyromagnétique.

g : facteur de Landé (constante sans dimension).

q : charge algébrique du noyau en rotation (C).

m : masse du noyau en rotation (kg).

• La norme du moment cinétique de spin a pour expression : $S = \sqrt{I(I+1)} \frac{h}{2\pi}$.

I est le spin nucléaire (valeur positive entière ou demi-entière).

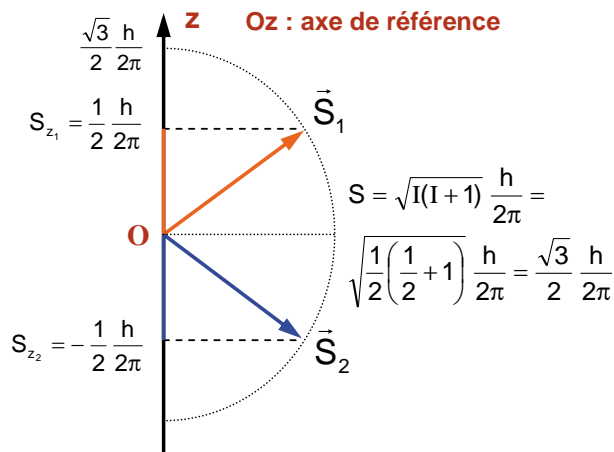
h est la constante de Planck.

• La composante S_z du moment cinétique de spin suivant un axe de référence Oz est quantifiée, elle ne peut prendre que certaines valeurs données par la relation : $S_z = m_l \frac{h}{2\pi}$.

m_l est le nombre quantique magnétique de spin de valeurs : $-I$; $-I+1$; $-I+2$; ; $+I$.

Pour le proton, $I = \frac{1}{2}$ et ainsi m_l ne prend que 2 valeurs : $-\frac{1}{2}$ et $+\frac{1}{2}$.

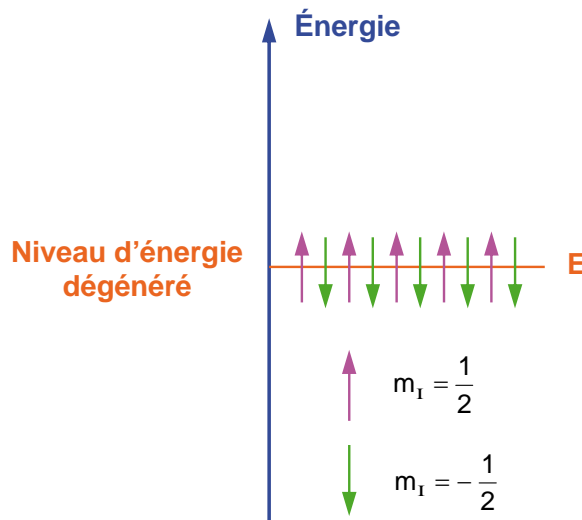
On obtient le diagramme suivant pour le moment cinétique de spin et ses projections :



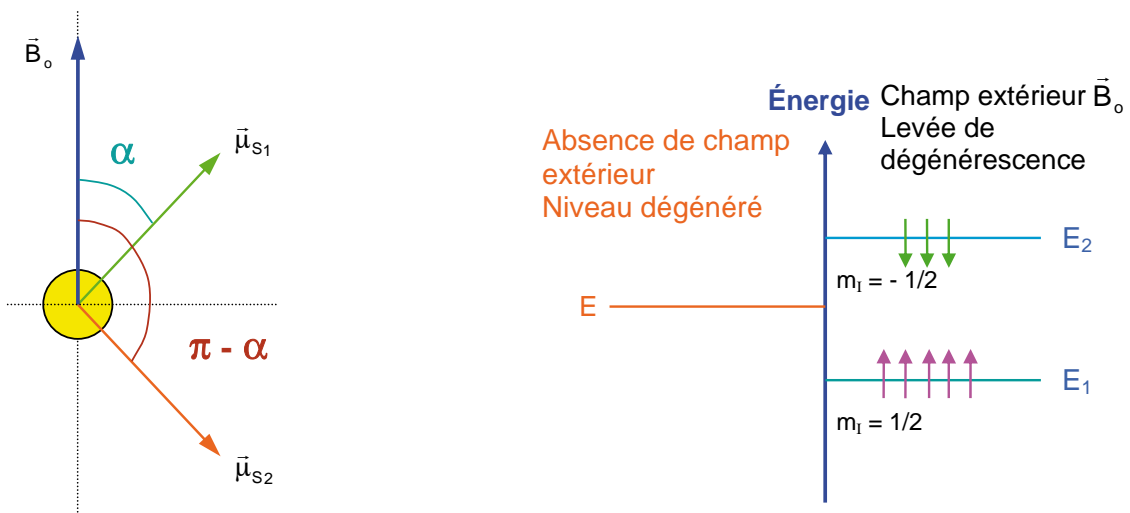
Pour le moment magnétique de spin, on obtient un diagramme analogue puisque $\vec{\mu}_s$ est proportionnel à \vec{S} .

II – Influence d'un champ magnétique extérieur

- En l'absence de champ magnétique extérieur, tous les noyaux, quel que soit leur moment magnétique de spin, ont la même énergie. On dit que le niveau est dégénéré.



- En présence d'un champ magnétique extérieur, il y a levée de dégénérescence ; le moment magnétique prend 2 orientations différentes par rapport au champ magnétique extérieur (parallèle : $m_I = \frac{1}{2}$, orientation α par rapport à \vec{B}_0 et antiparallèle : $m_I = -\frac{1}{2}$, orientation $\pi - \alpha$ par rapport à \vec{B}_0), avec une énergie plus basse pour le niveau parallèle.



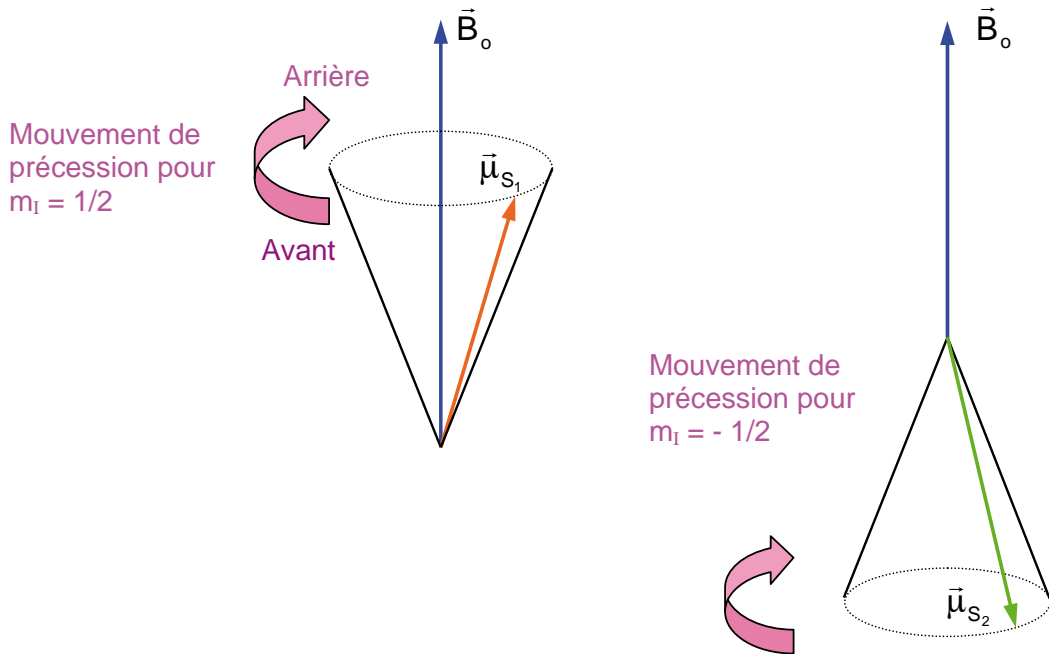
- L'énergie des niveaux (E_1 ou E_2) est donnée par : $E = -\mu_z B_0 = -\gamma S_z B_0 = -\gamma m_I \frac{h}{2\pi} B_0$; on

a ainsi : $E_1 = -\gamma \left(\frac{1}{2}\right) \frac{h}{2\pi} B_0$ et $E_2 = -\gamma \left(-\frac{1}{2}\right) \frac{h}{2\pi} B_0 = \gamma \left(\frac{1}{2}\right) \frac{h}{2\pi} B_0$.

La différence d'énergie entre les niveaux E_1 et E_2 est donc : $\Delta E = E_2 - E_1 = \gamma \frac{h}{2\pi} B_0$.

III – Mouvement de précession

- Le moment magnétique a un mouvement de précession autour de \vec{B}_0 tout comme une toupie autour d'un axe vertical.



- La relation de Larmor donne la vitesse angulaire de précession du moment magnétique : $\omega_o = \gamma B_o$. En vecteur, la relation s'écrit : $\vec{\omega}_o = -\gamma \vec{B}_o$.

Or $\omega_o = 2\pi f_o$ (ω_o en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$), on en déduit la fréquence de Larmor : $f_o = \frac{\gamma B_o}{2\pi}$.

- La transition entre les niveaux E_1 et E_2 est utilisée en IRM. Pour cela, on choisit un rayonnement de fréquence $\nu = f_o$ (fréquence de Larmor) ; l'absorption d'un tel photon provoque la transition $E_1 \rightarrow E_2$. Il s'ensuit la transition spontanée $E_2 \rightarrow E_1$ qui est exploitée en IRM.

2 Exercices corrigés

Application 1

- Calculer le rapport gyromagnétique de l'électron et du proton.

Données : g_e (facteur de Landé) = 2 ; $g_{\text{proton}} = 5,586$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg ; $m_{\text{proton}} = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

- En déduire la valeur du moment magnétique de spin du proton.

1) On applique la relation $\gamma = g \frac{q}{2m}$.

$$\gamma_{e^-} = g_e \frac{q_e}{2m_{e^-}} = 2 \frac{-1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}} = -1,76 \cdot 10^{11} \text{ uSI.}$$

$$\gamma_p = g_p \frac{q_p}{2m_p} = 5,586 \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} = 2,68 \cdot 10^8 \text{ uSI.}$$

$$2) \mu_s = \gamma_p S = \gamma_p \sqrt{I(I+1)} \frac{h}{2\pi} = \gamma_p \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + 1 \right)} \frac{h}{2\pi} = \gamma_p \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{h}{2\pi}$$

$$\text{A.N. : } \mu_s = 2,68 \cdot 10^8 \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2\pi} = 2,45 \cdot 10^{-26} \text{ uSI.}$$

Application 2

Le noyau de ^{17}O a un spin I égal à $\frac{5}{2}$.

- 1) Quelles sont les valeurs possibles du nombre quantique magnétique de spin m_I ?
- 2) En déduire le nombre de niveaux d'énergie résultant de la levée de dégénérescence par un champ magnétique extérieur.

1) Les différentes valeurs de m_I sont : $-I$; $-I + 1$; $-I + 2$; ; $+I$.

On a donc ici, $m_I = -\frac{5}{2}$; $-\frac{3}{2}$; $-\frac{1}{2}$; $\frac{1}{2}$; $\frac{3}{2}$; $\frac{5}{2}$.

2) On a ainsi 6 niveaux d'énergie différents lors de la levée de dégénérescence puisqu'on a 6 valeurs pour m_I .

Application 3

Données : $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s ; $\gamma_{\text{proton}} = 2,68 \cdot 10^8$ uSI.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilise la résonance magnétique du proton. Le spin du proton est $I = \frac{1}{2}$.

- 1) Calculer la valeur du moment cinétique de spin S du proton.
- 2) Quelles sont les valeurs des projections du vecteur moment cinétique de spin \vec{S} sur un axe de référence Oz ?
- 3) On applique un champ de 2 T, calculer l'énergie des niveaux dédoublés E_1 et E_2 résultant de la levée de dégénérescence.
- 4) En déduire l'écart énergétique entre ces deux niveaux.

$$1) S = \sqrt{I(I+1)} \frac{h}{2\pi} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2\pi} = 9,12 \cdot 10^{-35} \text{ J.s.}$$

2) $S_z = m_I \frac{h}{2\pi}$ avec $m_I = \pm \frac{1}{2}$. On obtient donc :

$$S_{z_1} = \frac{1}{2} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2\pi} = 5,27 \cdot 10^{-35} \text{ J.s} \text{ et } S_{z_2} = -\frac{1}{2} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2\pi} = -5,27 \cdot 10^{-35} \text{ J.s.}$$

3) On applique la relation : $E = -\mu_z B_0 = -\gamma S_z B_0 = -\gamma m_I \frac{h}{2\pi} B_0$, ce qui donne :

$$E_1 = -\gamma \left(\frac{1}{2}\right) \frac{h}{2\pi} B_0 = -2,68 \cdot 10^8 \frac{1}{2} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2\pi} 2 = -2,82 \cdot 10^{-26} \text{ J ;}$$

$$E_2 = -\gamma \left(-\frac{1}{2}\right) \frac{h}{2\pi} B_0 = \gamma \left(\frac{1}{2}\right) \frac{h}{2\pi} B_0 = 2,68 \cdot 10^8 \frac{1}{2} \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2\pi} 2 = 2,82 \cdot 10^{-26} \text{ J.}$$

$$4) \Delta E = E_2 - E_1 = 5,64 \cdot 10^{-26} \text{ J.}$$

Application 4

Donnée : $\gamma_{\text{proton}} = 2,68 \cdot 10^8$ uSI.

Lors d'une IMR, on utilise un champ magnétique de 1,5 T.

- 1) Calculer la valeur de la vitesse angulaire de précession du moment magnétique du proton.
- 2) En déduire la fréquence de résonance.

$$1) \omega_0 = \gamma B_0 = 2,68 \cdot 10^8 \cdot 1,5 = 4,02 \cdot 10^8 \text{ rads}^{-1}.$$

2) La résonance du proton est obtenue lorsque la fréquence ν de l'onde électromagnétique utilisée est égale à la fréquence de Larmor f_0 .

$$\text{Or } \omega_0 = 2\pi f_0, \text{ d'où } \nu = f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{4,02 \cdot 10^8}{2\pi} = 6,40 \cdot 10^7 \text{ Hz} = 64 \text{ MHz.}$$

PARTIE 6

ACOUSTIQUE

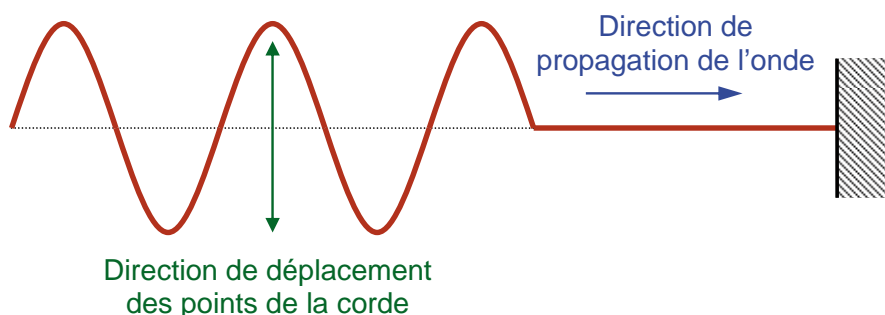
- > Chapitre 19 : les ondes sonores 124
- > Chapitre 20 : les ondes ultrasonores 129

CHAPITRE 19 / LES ONDES SONORES

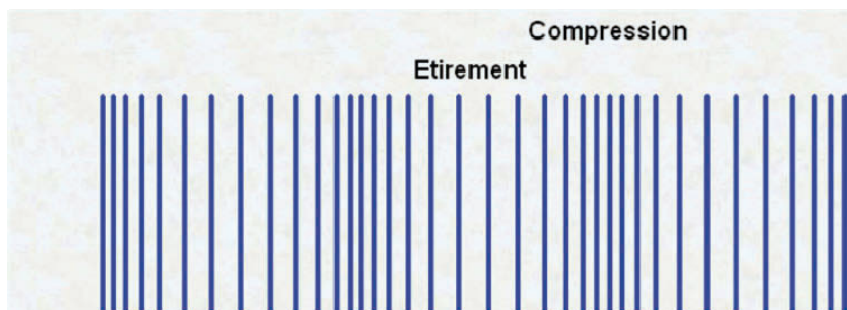
1 Essentiel du cours

I – Définitions

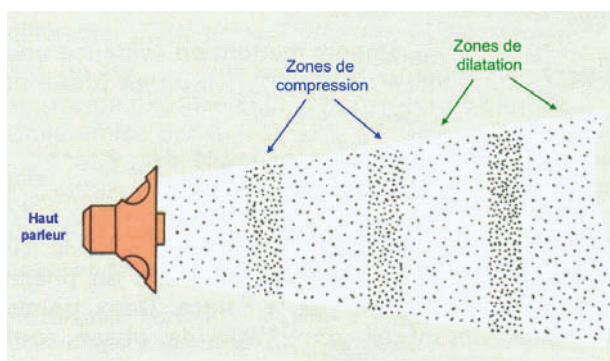
- On appelle onde mécanique progressive, la propagation d'un mouvement vibratoire dans un milieu matériel élastique sans transport de matière mais avec transport d'énergie.
- Une onde est transversale lorsque chaque point du milieu élastique se déplace perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde.
C'est le cas par exemple d'une onde se propageant sur une corde ou à la surface de l'eau.



- Une onde est longitudinale lorsque chaque point du milieu élastique se déplace parallèlement à la direction de propagation de l'onde.
C'est le cas d'une onde se propageant dans un ressort ou d'une onde sonore.
– En effet, la vibration du dispositif qui met en mouvement la première spire du ressort est horizontale de même que la direction de propagation de l'onde.



- Concernant l'onde sonore, la vibration de la membrane du haut-parleur, mettant en mouvement la tranche d'air située devant elle, est horizontale, de même que la direction de propagation de l'onde.

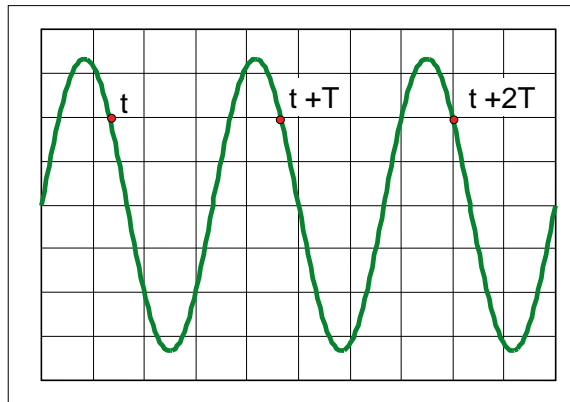


II – Propagation d'une onde sonore

- Contrairement aux ondes électromagnétiques (lumière, rayons X, γ) qui se propagent dans le vide, le son ou les ondes mécaniques en général nécessitent un milieu matériel élastique (solide, liquide ou gazeux) pour se propager.

- Le son capté par un micro placé devant un haut-parleur alimenté par une tension alternative sinusoïdale est identique aux dates t , $t + T$, $t + 2 T$, etc.

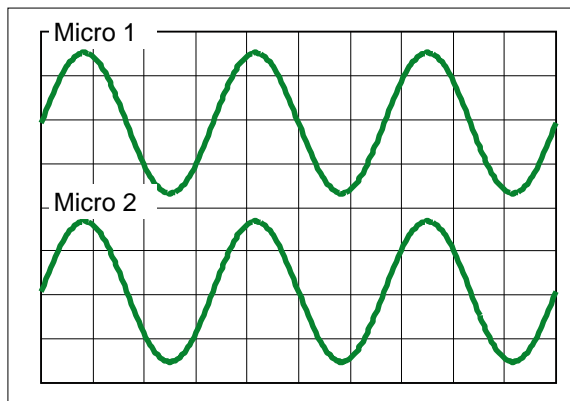
T (en s) représente la période de l'onde sonore.



La fréquence (en Hz) de l'onde sonore est définie par : $f = \frac{1}{T}$.

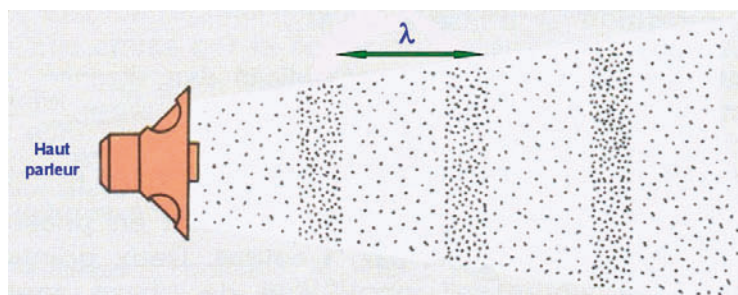
- À un même instant, les signaux captés par deux micros placés devant un haut-parleur alimenté par une tension alternative sinusoïdale sont en phase lorsque, le micro 1 étant placé à la distance d du haut-parleur, le micro 2 est placé à la distance $d + \lambda$ ou $d + 2 \lambda$ ou $d + 3 \lambda$, etc.

λ (en m) représente la longueur d'onde de l'onde sonore. Elle correspond à la distance parcourue par l'onde en une période.



Si la distance entre les deux micros est différente de $k \lambda$ (k entier positif), alors les deux courbes présentent un décalage latéral (déphasage).

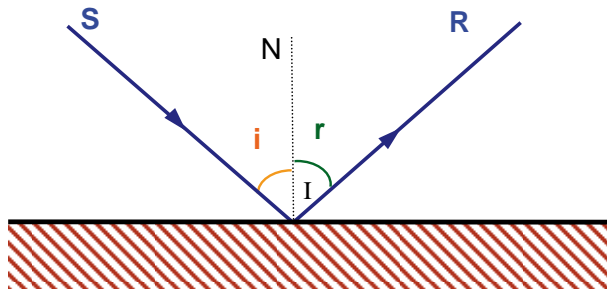
On peut aussi mesurer la longueur d'onde entre deux zones de compression (ou entre deux zones de dilatation) consécutives de l'onde sonore.



- Dans l'air sec à 15 °C, la célérité d'une onde sonore est de 340 m.s⁻¹ quelle que soit sa fréquence (c'est-à-dire qu'un son grave se propage à la même vitesse qu'un son aigu).

III – Propriétés des ondes sonores

- Les ondes sonores se réfléchissent sur les obstacles conformément à la loi de Descartes : $i = r$ (i : angle d'incidence, r : angle de réflexion).



- On appelle impédance acoustique d'un milieu élastique de propagation, le produit : $Z = \rho c$. (ρ : masse volumique du milieu élastique en kg.m⁻³; c : célérité de l'onde sonore dans le milieu en m.s⁻¹; Z en kg.m⁻².s⁻¹ encore appelé Rayl).
 - L'intensité sonore I (en W.m⁻²) est le rapport de la puissance acoustique par la surface sur laquelle elle s'exerce : $I = \frac{P}{S}$.
 - Le niveau d'intensité sonore L_i (en décibels : dB) est défini par : $L_i = 10 \log \frac{I}{I_0}$.
- I : intensité sonore (W.m⁻²).
I₀ : intensité sonore de référence (seuil d'audition à 1 kHz de valeur 10⁻¹² W.m⁻²).
- Le domaine des fréquences audibles s'étend de 20 Hz à 20 kHz.

2 Exercices corrigés

Application 1

On considère différentes ondes mécaniques : signal le long d'une corde, signal le long d'un ressort, onde à la surface de l'eau, onde sonore dans l'air.
Dans chaque cas dire si l'onde mécanique est transversale ou longitudinale.

Rappelons les définitions des ondes transversales et longitudinales.

- Onde transversale : le déplacement des points du milieu élastique est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.
- Onde longitudinale : le déplacement des points du milieu élastique est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

Le signal le long d'une corde et l'onde à la surface de l'eau sont des ondes mécaniques transversales.

Le signal le long d'un ressort et l'onde sonore dans l'air sont des ondes mécaniques longitudinales.

Application 2

Un micro placé devant un haut-parleur alimenté par une tension alternative sinusoïdale est relié à un oscilloscope. La base de temps de celui-ci est réglée à 20 μs par division ; deux maxima successifs de la sinusoïde sur l'écran sont distants de quatre divisions.
Déterminer la période et la fréquence de l'onde sonore.

La période s'obtient en faisant le produit du nombre de divisions entre deux points équivalents de la sinusoïde par la base de temps de l'oscilloscope.

$$T = 4.20.10^{-6} = 8.10^{-5} \text{ s.}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{8.10^{-5}} = 12500 \text{ Hz.}$$

Application 3

Deux micros M_1 et M_2 placés devant un haut-parleur alimenté par une tension alternative sinusoïdale sont reliés à un oscilloscope. Initialement, les deux micros sont côte à côte, à égale distance du haut-parleur et les sinusoïdes sur l'écran de l'oscilloscope sont identiques et en phase. On éloigne ensuite M_2 de M_1 , dans l'axe du haut-parleur le long d'une règle graduée, ce qui produit un décalage latéral des courbes sur l'écran ; on observe que les signaux se retrouvent en phase pour la première fois lorsqu'on a éloigné M_2 de 4,25 cm par rapport à la position initiale et un phénomène identique se reproduit tous les 4,25 cm.

Donnée : la célérité du son dans l'air dans les conditions de l'expérience est de 340 m.s^{-1} .

- 1) Quelle est la longueur d'onde du son émis par le haut-parleur ?
- 2) En déduire sa fréquence. S'agit-il d'un son grave ou aigu ?

1) Les signaux sont en phase à chaque fois que la distance entre les deux micros est égale à λ ou un multiple entier de λ . On a donc ici $\lambda = 4,25 \text{ cm}$.

2) La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde en une période. On a donc la relation : $\lambda = c T = \frac{c}{f}$ et par conséquent : $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{4,25.10^{-2}} = 8000 \text{ Hz}$.

Rappelons que les sons audibles s'étendent de 20 Hz (sons graves) à 20 000 Hz (sons aigus), il s'agit donc là d'un son aigu.

Application 4

Calculer les impédances acoustiques de l'air, de l'eau et de l'acier.

Données :

Milieu	$\rho \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	$c \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$
Air	1,3	340
Eau	1 000	1 500
Acier	7 850	5 000

On applique la relation $Z = \rho c$.

$$Z_{\text{air}} = 1,3.340 = 442 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ (ou Rayls).}$$

$$Z_{\text{eau}} = 1000.1500 = 1,50.10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ (ou Rayls).}$$

$$Z_{\text{acier}} = 7850.5000 = 3,93.10^7 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ (ou Rayls).}$$

Application 5

Une source sonore ponctuelle S émet un son de puissance $P = 10 \text{ W}$ dans toutes les directions de l'espace. On admet que les surfaces d'onde sont sphériques de centre S.

- 1) Quelle est l'intensité sonore à 5 m de la source ?
- 2) En déduire le niveau d'intensité sonore.

Donnée : seuil d'audition à 1 kHz : $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

1) À 5 m de la source, la puissance sonore se répartit sur une sphère de rayon $R = 5 \text{ m}$ centrée sur la source. Rappelons que la surface d'une sphère est donnée par la relation $S = 4 \pi R^2$.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \pi R^2} = \frac{10}{4 \pi 5^2} = 0,032 \text{ W.m}^{-2}.$$

$$2) L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{0,032}{10^{-12}} = 105 \text{ dB.}$$

Application 6

Donnée : seuil d'audition à 1 kHz : $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

Un instrument de musique émet, à une distance donnée, un son de niveau d'intensité $L_1 = 50 \text{ dB}$.

1) Quelle est l'intensité sonore à cette distance ?

2) Sachant que les intensités sonores s'additionnent, calculer l'intensité sonore résultante, produite à cette distance par 30 instruments d'un orchestre jouant simultanément. En déduire le niveau d'intensité sonore correspondant.

$$1) L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} ; \frac{L_1}{10} = \log \frac{I}{I_0} ; \frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L_1}{10}} ; I = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{50}{10}} = 10^{-7} \text{ W.m}^{-2}.$$

2) Intensité sonore résultante : $I = 30 \cdot 10^{-7} \text{ W.m}^{-2}$.

$$L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{30 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}} = 64,8 \text{ dB}.$$

CHAPITRE 20 / LES ONDES ULTRASONORES

1 Essentiel du cours

I – Généralités

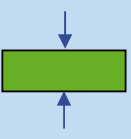
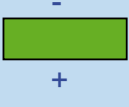
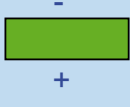
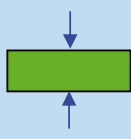

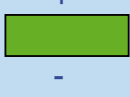
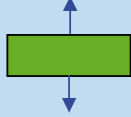
- Les ultrasons sont des ondes acoustiques de fréquences comprises entre 20 kHz et 100 MHz.

- Ils sont obtenus grâce aux propriétés piézoélectriques d'un élément en céramique.

Effet direct : l'élément en céramique produit une tension à ses bornes lorsqu'on le soumet à une contrainte mécanique.

Effet inverse : l'élément en céramique produit une déformation lorsqu'on le soumet à une tension électrique.

L'effet étant réversible, tout émetteur peut fonctionner en récepteur.

Effet direct		Effet inverse	
Cause	Effet	Cause	Effet
			
			

II – Les propriétés des ultrasons

- Le phénomène de diffraction se produit lorsque la sortie de l'émetteur ultrasonore présente un diamètre inférieur ou du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du faisceau ultrasonore. Le faisceau cylindrique est alors transformé en un faisceau conique d'angle d'ouverture θ tel que :

$$\theta(\text{rad}) = \frac{2\lambda}{a}$$
 (λ : longueur d'onde des ultrasons ; a : diamètre de l'ouverture circulaire de sortie de l'émetteur).

Dans le cas contraire, si le diamètre de l'ouverture est très supérieur à la longueur d'onde, le faisceau reste pratiquement cylindrique à la sortie. On dit alors que **l'émission est dirigée**.

- Lorsqu'un faisceau ultrasonore traverse un milieu donné, son intensité (puissance par unité de surface) diminue suivant la loi exponentielle : $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$.

$I(x)$ (W.m^{-2}) : intensité du faisceau après avoir traversé une épaisseur x du milieu.

I_0 (W.m^{-2}) : intensité initiale du faisceau.

α : coefficient d'absorption caractéristique du milieu.

Remarque

Il faut bien sûr utiliser des unités concordantes pour α et x (respectivement cm^{-1} et cm par exemple).

Dans un milieu donné, le coefficient d'absorption est proportionnel au carré de la fréquence des ultrasons : $\alpha = k \nu^2$.

- La frontière entre deux milieux différents est appelée interface.

De part et d'autre de l'interface, chaque milieu est caractérisé par son impédance acoustique vue au chapitre précédent : $Z = \rho c$.

ρ : masse volumique du milieu de propagation (kg.m^{-3}).

c : célérité de l'onde sonore dans le milieu considéré (m.s^{-1}).

Z : impédance acoustique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ou Rayl).

Lorsqu'une onde ultrasonore rencontre une interface, une partie de l'onde est réfléchiée, l'autre partie est transmise.

- On appelle coefficient de réflexion d'un faisceau ultrasonore rencontrant une interface sous

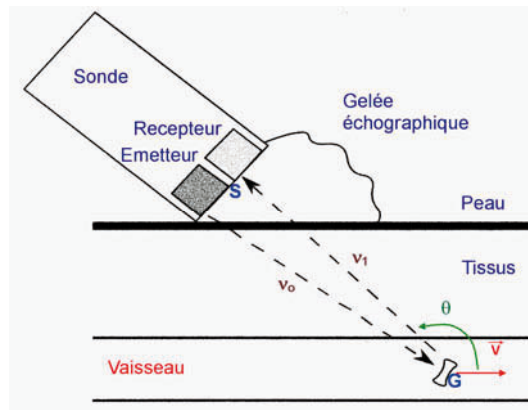
incidence normale le rapport : $R = \frac{I_{\text{réfléchiée}}}{I_{\text{incidente}}} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$.

Z_1 et Z_2 sont les impédances acoustiques des milieux situés de part et d'autre de l'interface.

- On appelle coefficient de transmission le rapport : $T = \frac{I_{\text{transmise}}}{I_{\text{incidente}}} = 1 - R = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$.

III – Application à l'imagerie

- La vélocimétrie Doppler consiste à mesurer la vitesse du sang dans les vaisseaux superficiels en analysant l'écho d'un faisceau ultrasonore sur les globules rouges en mouvement.



La fréquence Doppler est donnée par l'expression : $\Delta v = v_1 - v_0 = 2 \frac{v_0}{c} v \cos \theta$.

v_1 : fréquence de l'onde réfléchiée.

v_0 : fréquence de l'onde incidente.

c : célérité des ultrasons dans les tissus mous.

v : vitesse du globule rouge.

θ : angle (\vec{v}, \vec{GS}) ; G : globule rouge ; S : sonde.

- Principe de calcul en échographie : pendant la durée τ entre l'émission du signal ultrasonore et sa réception, l'onde ultrasonore fait un aller-retour et parcourt la distance $L = 2 d$ (d étant la distance entre la sonde et l'interface) à la célérité c . On a donc : $L = 2 d = c \tau$ et par conséquent

$$d = \frac{L}{2} = \frac{c \tau}{2}$$

2 Exercices corrigés

Application 1

- 1) Calculer les impédances acoustiques du muscle, de la graisse et de l'os.
- 2) En déduire les coefficients de réflexion et de transmission sur l'interface muscle-os.

Données :

Milieu	ρ (kg.m ⁻³)	c (m.s ⁻¹)
Muscle	1,04.10 ³	1 580
Graisse	0,92.10 ³	1 450
Os	1,65.10 ³	4 000

- 1) On applique la relation $Z = \rho c$.
 $Z_{\text{muscle}} = 1,04.10^3.1580 = 1,64.10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (ou Rayls).
 $Z_{\text{graisse}} = 0,92.10^3.1450 = 1,33.10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (ou Rayls).
 $Z_{\text{os}} = 1,65.10^3.4000 = 6,60.10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (ou Rayls).

$$2) R_{\text{muscle-os}} = \left(\frac{Z_{\text{muscle}} - Z_{\text{os}}}{Z_{\text{muscle}} + Z_{\text{os}}} \right)^2 = \left(\frac{1,64.10^6 - 6,60.10^6}{1,64.10^6 + 6,60.10^6} \right)^2 = 0,36 = 36\%.$$

$$T_{\text{muscle-os}} = 1 - R_{\text{muscle-os}} = 1 - 36 = 64\%.$$

Application 2

On utilise un émetteur ultrasonore de fréquence $\nu = 100 \text{ kHz}$ dans un milieu pour lequel la célérité est de 1500 ms^{-1} .

- 1) Calculer la longueur d'onde du faisceau ultrasonore.
- 2) Le diamètre de sortie noté a de l'émetteur vaut 2 cm , calculer l'angle θ de diffraction. Peut-on dire que le faisceau est directif ?
- 3) On ajuste à présent la fréquence de l'émetteur à 2 MHz . Calculer la longueur d'onde des ultrasons et le nouvel angle de diffraction. Le faisceau est-il directif ?

$$1) \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1500}{10^5} = 0,015 \text{ m} = 1,5 \text{ cm}.$$

$$2) \theta = \frac{2\lambda}{a} = \frac{2 \cdot 1,5}{2} = 1,5 \text{ rad} = 86^\circ.$$

La diffraction est très importante, le faisceau n'est pas du tout directif.

$$3) \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1500}{2 \cdot 10^6} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,075 \text{ cm}.$$

$$\theta = \frac{2\lambda}{a} = \frac{2 \cdot 0,075}{2} = 0,075 \text{ rad} = 4,3^\circ.$$

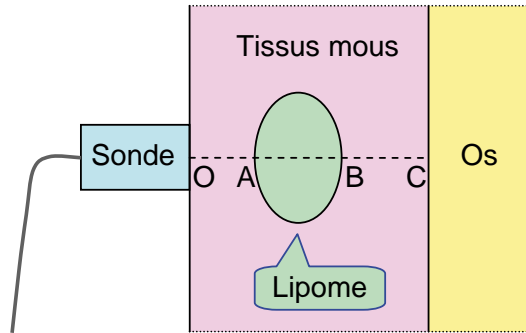
La diffraction est faible, le faisceau reste directif.

Application 3

Données :

Milieu	Coefficient d'atténuation α (m ⁻¹) à 2 MHz	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Célérité c (m.s ⁻¹)
Tissus mous	100	1,04.10 ³	≈ 1 500
Graisse	38,2	0,92.10 ³	≈ 1 500
Os	1 000	1,65.10 ³	4 000

On utilise une sonde ultrasonore de fréquence 2 MHz pour analyser les dimensions d'une tumeur graisseuse (lipome) localisée au niveau de l'avant-bras d'un patient.



- 1) Calculer les impédances acoustiques des tissus mous, de la graisse et de l'os. En déduire les coefficients de réflexion des interfaces tissus mous-graisse et tissus mous-os.
- 2) On relève trois échos à $\tau_1 = 20 \mu\text{s}$ (face avant du lipome), $\tau_2 = 45 \mu\text{s}$ (face arrière du lipome) et $\tau_3 = 75 \mu\text{s}$ (face avant de l'os). Déterminer les distances $d_1 = OA$, $d_2 = OB$ et $d_3 = OC$. En déduire l'épaisseur du lipome.
- 3) Calculer le pourcentage d'intensité ultrasonore restant après traversée de 2 cm de tissus mous, de 2 cm de graisse, de 2 cm d'os.
- 4) Le faisceau ultrasonore a une intensité initiale $I_0 = 10 \text{ W.m}^{-2}$, calculer :
 - a) l'intensité incidente I_i en A ;
 - b) l'intensité réfléchie I_r en A ;
 - c) l'intensité I_e du premier écho reçu en O.
- 5) Calculer l'atténuation $A = 10 \log \left(\frac{I_0}{I_e} \right)$ du premier écho reçu.

$$1) Z_{\text{tissus mous}} = \rho_{\text{tissus mous}} c_{\text{tissus mous}} = 1,04 \cdot 10^3 \cdot 1500 = 1,56 \cdot 10^6 \text{ Rayls.}$$

$$Z_{\text{graisse}} = \rho_{\text{graisse}} c_{\text{graisse}} = 0,92 \cdot 10^3 \cdot 1500 = 1,38 \cdot 10^6 \text{ Rayls.}$$

$$Z_{\text{os}} = \rho_{\text{os}} c_{\text{os}} = 1,65 \cdot 10^3 \cdot 4000 = 6,60 \cdot 10^6 \text{ Rayls.}$$

$$R_{\text{tissus mous-graisse}} = \left(\frac{Z_{\text{tissus mous}} - Z_{\text{graisse}}}{Z_{\text{tissus mous}} + Z_{\text{graisse}}} \right)^2 = \left(\frac{1,56 \cdot 10^6 - 1,38 \cdot 10^6}{1,56 \cdot 10^6 + 1,38 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,0037 = 0,37\%.$$

$$R_{\text{tissus mous-os}} = \left(\frac{Z_{\text{tissus mous}} - Z_{\text{os}}}{Z_{\text{tissus mous}} + Z_{\text{os}}} \right)^2 = \left(\frac{1,56 \cdot 10^6 - 6,60 \cdot 10^6}{1,56 \cdot 10^6 + 6,60 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,38 = 38\%.$$

2) Entre l'émission de l'onde et la réception de l'écho, les ultrasons parcourent la distance aller-retour $2d$ (d étant la distance entre la sonde et l'interface). On a donc $2d = c\tau$; $d = \frac{c\tau}{2}$.

$$d_1 = \frac{c\tau_1}{2} = \frac{1500 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,015 \text{ m} = 1,5 \text{ cm.}$$

$$d_2 = \frac{c\tau_2}{2} = \frac{1500 \cdot 45 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,034 \text{ m} = 3,4 \text{ cm.}$$

$$d_3 = \frac{c\tau_3}{2} = \frac{1500 \cdot 75 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,056 \text{ m} = 5,6 \text{ cm.}$$

Le lipome a une épaisseur $e = d_2 - d_1 = 3,4 - 1,5 = 1,9 \text{ cm}$.

3) On applique la loi de décroissance de l'intensité : $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$:

$$I(x = 2 \text{ cm de tissus mous}) = I_0 e^{-\alpha x} = I_0 e^{-100 \cdot 0,02} = 0,14 I_0 = 14\% \text{ de } I_0.$$

$$I(x = 2 \text{ cm de graisse}) = I_0 e^{-\alpha x} = I_0 e^{-38,2 \cdot 0,02} = 0,47 I_0 = 47\% \text{ de } I_0.$$

$$I(x = 2 \text{ cm d'os}) = I_0 e^{-\alpha x} = I_0 e^{-1000 \cdot 0,02} = 2 \cdot 10^{-9} I_0 = 2 \cdot 10^{-7}\% \text{ de } I_0.$$

On remarque que l'atténuation à travers l'os est extrêmement importante.

$$4) I_i = I_0 e^{-\alpha x} = I_0 e^{-100 \cdot 0,015} = I_0 \cdot 0,22 = 0,22 \cdot 10 = 2,2 \text{ W.m}^{-2}.$$

$$I_r = R_{\text{tissus mous-graisse}} \cdot I_i = 0,0037 \cdot 2,2 = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}.$$

$$I_e = I_r e^{-\alpha x} = 8,1 \cdot 10^{-3} e^{-100 \cdot 0,015} = 8,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,22 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$5) A = 10 \log \left(\frac{I_o}{I_e} \right) = 10 \log \left(\frac{10}{1,8 \cdot 10^{-3}} \right) = 37,4 \text{ dB}.$$

Application 4

Un Doppler de fréquence 2 MHz est orienté d'un angle $\theta = 120^\circ$ par rapport à un vaisseau sanguin d'une jambe ; il mesure une fréquence Doppler $\Delta\nu = -600$ Hz. Quelle est la vitesse du sang dans ce vaisseau ?

Donnée : la célérité des ultrasons dans les tissus mous est égale à $1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

On applique la relation $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_o = 2 \frac{v_o}{c} \nu \cos \theta$ dans laquelle on isole v .

$$v = \frac{c \Delta\nu}{2 \nu_o \cos \theta} = \frac{1500 (-600)}{2 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot \cos 120^\circ} = 0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Section B : sujets d'annales corrigés

> Session 2009	135
> Session 2008	145
> Session 2007	155
> Session 2006	165
> Session 2005	175
> Session 2004	182
> Session 2003	194
> Session 2002	204
> Session 2001	213
> Session 2000	220
> Session 1999	230
> Session 1998	238

SESSION 2009

PREMIÈRE PARTIE : CONTRÔLE DE CONNAISSANCES (30 points)

Données :

Constante de Planck	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
1 eV (électronvolt)	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Surface d'une sphère de rayon r	$4 \pi r^2$
Surface d'un disque de rayon r	πr^2
Périmètre d'un disque de rayon r	$2 \pi r$

Q1. QUESTIONNAIRE À CHOIX MULTIPLES (15 points)

Chacune des propositions de 1 à 9 contient une seule affirmation vraie (a, ou b, ou c, ou d). Choisir la bonne affirmation sans la justifier pour les questions 1, 2, 3, 4, 5, 6 et en la justifiant pour les questions 7, 8, 9.

- Les ondes électromagnétiques :
 - se propagent dans le vide d'autant plus rapidement que leur fréquence est plus élevée ;
 - transportent une énergie d'autant plus grande que leur fréquence est plus élevée ;
 - sont des ondes mécaniques ;
 - ne se propagent pas dans le vide.
- Les électrons accélérés dans un tube à rayons X :
 - acquièrent une énergie cinétique qui dépend de la tension accélératrice ;
 - se déplacent de l'anode vers la cathode ;
 - décrivent un trajet en forme de spirale afin de permettre de réduire l'encombrement d'un tube à rayons X ;
 - provoquent dans le tube un courant électrique dont l'intensité est de l'ordre de plusieurs milliers d'ampère.
- La capture électronique :
 - peut entrer en compétition avec la radioactivité β^+ ;
 - peut entrer en compétition avec la radioactivité β^- ;
 - peut être associée à une émission gamma provenant du cortège électronique ;
 - n'est pas une réaction isobarique.
- Lors d'un examen scintigraphique avec le technétium 99 m (noyau métastable), on détecte :
 - des électrons ;
 - des positons ;
 - des particules α ;
 - des photons.
- Dire que l'énergie d'un atome est quantifiée, cela signifie que :
 - cette énergie est un multiple de la constante de Planck h ;
 - cette énergie est toujours un nombre entier ;
 - cette énergie ne peut prendre que des valeurs discrètes ;
 - cet atome est à l'état fondamental.
- L'effet photoélectrique :
 - se produit entre un photon et un électron ;
 - se produit entre un photon et un noyau ;
 - donne naissance à un photon diffusé ;
 - se produit quelle que soit l'énergie du photon incident.