

Transfert quantique d'énergie

Dualité onde particule

Bien des physiciens croient que la meilleure façon de décrire le monde de l'atome demeure le modèle mathématique, et qu'à travers les équations nous pouvons entrevoir la façon complexe dont le monde microscopique est ordonné.

Mais un orage souffle sur la physique du vingtième siècle, faisant trembler ses fondations et jetant la confusion sur la nature même de ses concepts les plus ultimes.

Véritable révolution qui vient jeter un pavé dans la mare pourtant si tranquille de nos croyances acquises jusqu'alors, la physique quantique se révèle une théorie sans commune mesure avec tout ce qu'on croyait savoir au sujet du monde atomique.

La théorie quantique décrit un monde étrange, où l'on découvre que la matière qui constitue tout notre univers, et qui semble pourtant bien localisée dans l'espace est en fait étendue quelque part.

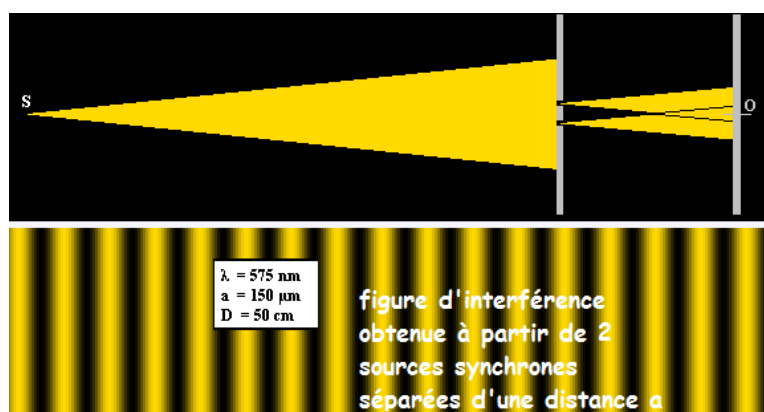
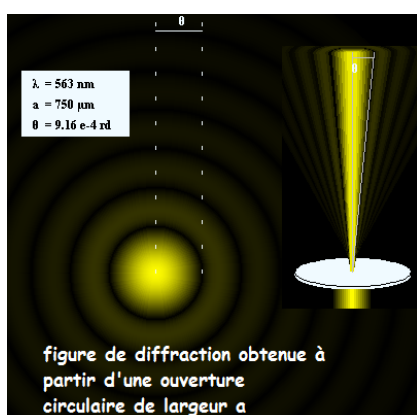
Les repères comme ici et là-bas, qui sont si cohérents à notre échelle perdent toute signification dès qu'on franchit les limites du monde atomique.

A- Aspect ondulatoire et particulaire de la lumière

1- La lumière - Onde ou particule?

Pourquoi peut-on affirmer que la lumière est une onde?

L'observation des phénomènes de diffraction et d'interférences nous permettent d'affirmer que la lumière est une onde.



Dans le "Traité de la lumière", Christian Huygens (1643- 1695) interprète la lumière comme la propagation d'une onde. Maxwell (1831-1879) élabore la théorie de la propagation des ondes électromagnétiques (OEM). La lumière devint alors un cas particulier d'OEM de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780nm.

L'énergie E d'un photon (OEM) est donnée par la relation:

$$E = h \cdot \nu$$

E :	Energie (J)
h :	Constante de Planck (J.s)
ν :	Fréquence de l'onde (Hz)

Dans le vide, l'onde associée au photon d'énergie E a une longueur d'onde λ telle que:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E :	Energie (J)
h :	Constante de Planck (J.s)
ν :	Fréquence de l'onde (Hz)
c :	Célérité de la lumière dans le vide ($m \cdot s^{-1}$)
λ :	Longueur d'onde (m)

Plus la longueur d'onde est grande plus l'énergie est faible.

On peut calculer l'énergie des rayonnements rouge et bleu, se déplaçant dans le vide, de longueur d'onde $\lambda_{\text{rouge}}=720\text{nm}$, $\lambda_{\text{bleu}}=450\text{nm}$.

$$E_{\text{rouge}} = h \cdot \nu_{\text{rouge}} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{rouge}}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8}{722 \cdot 10^{-9}} = 2,76 \cdot 10^{-19} \text{J} = 1,73 \text{eV}$$

$$E_{\text{bleu}} = h \cdot \nu_{\text{bleu}} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{bleu}}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} = 4,42 \cdot 10^{-19} \text{J} = 2,76 \text{eV}$$

Pourquoi peut-on affirmer que la lumière peut être considérée comme une particule?

L'effet photo-électrique est un des trois articles révolutionnaires qu'Albert Einstein publia il y a exactement un siècle.

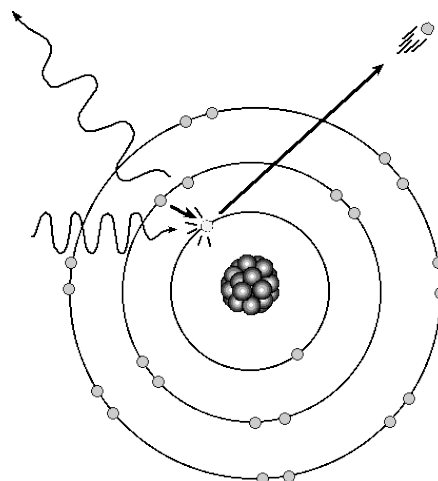
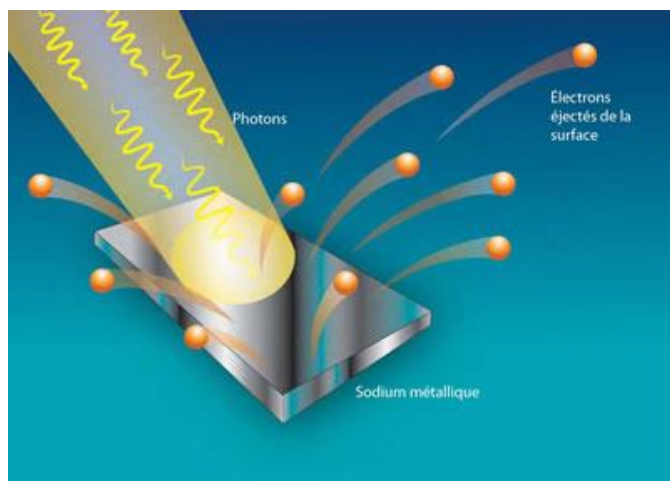
La lumière est quanta, c'est à dire ondes et corpuscules à la fois.

Eclairée par une lumière bleue, une plaque de métal éjecte des électrons: c'est l'effet photoélectrique.

Avec une lumière rouge, rien à faire, même en concentrant beaucoup de lumière en un point.

Cela est difficile à comprendre si l'on admet, comme tous les physiciens de l'époque, que la lumière n'est qu'une simple vibration, une onde transportant une énergie électromagnétique.

Einstein, élargissant une formule proposée par Max Planck en 1900, a attribué à la lumière une double nature: onde et corpuscule.



Un "photon bleu", plus énergétique qu'un "photon rouge" peut arracher un électron hors du métal. Cette idée de "quanta" d'énergie était féconde.

Quelques années plus tard, L. De Broglie, E. Schrödinger, W. Heisenberg attribueront la même double nature aux corpuscules comme l'électron ou le proton, les composants des atomes.

Ainsi est née la "physique quantique", substrat théorique décrivant les propriétés des composants ultimes de la matière.

En 1905 Albert Einstein postule que la lumière est constituée d'un flux de particules appelées photons. Il explique ainsi l'effet photoélectrique mis en évidence par Hertz en 1887: la lumière est constituée de particules appelées photons.

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

2- Relation de Louis De Broglie

En 1924 L. De Broglie généralise la dualité onde particule admise pour la lumière à tous objets microscopiques (électrons, protons, neutrons..).

Cette dualité a été mise en évidence en 1927 par l'observation du phénomène de diffraction puis, plus tard, d'interférence pour les électrons. De Broglie introduit la notion d'onde de matière.

A chaque particule en mouvement on associe une onde de matière de longueur d'onde λ liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation de de Broglie suivante:

$$p = m.v = \frac{h}{\lambda}$$

p : Quantité de mouvement (kg.m.s^{-1})
 m : Masse de la particule (kg)
 v : Vitesse de la particule (m.s^{-1})
 h : Constante de Planck (J.s)
 λ : Longueur d'onde (m)

Remarque: Si la masse est importante alors la quantité de mouvement $p=m.v$ est grande et donc la longueur d'onde λ est très faible. Or, pour observer le phénomène de diffraction il faut que l'ouverture soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ce qui devient impossible pour des valeurs de λ trop faible. Le caractère ondulatoire de l'électron ne peut pas être mis en évidence.

Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture est du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde λ de matière.

Par exemple, la taille a de l'ouverture permettant d'observer la diffraction d'un faisceau d'électrons de longueur de l'onde λ associée à un électron de masse $m=9,11.10^{-31}\text{kg}$ et de vitesse $v=40\text{m.s}^{-1}$, est:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6,63.10^{-34}}{9,11.10^{-31}.400} = 1,82.10^{-6}\text{m}$$

Pour observer la diffraction de ce faisceau d'électron il faut une ouverture de l'ordre du micromètre.

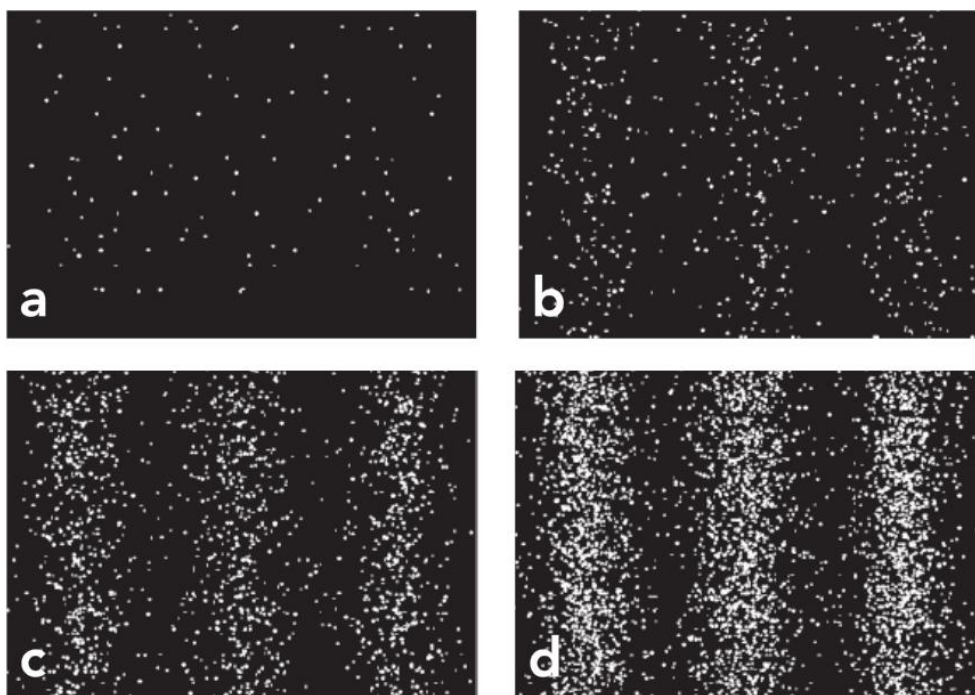
3- Aspect probabiliste des phénomènes quantiques

La physique quantique a pour but d'étudier et de décrire les phénomènes à l'échelle atomique. Développée au début du XX^{ème} siècle elle a permis d'expliquer des phénomènes comme le rayonnement du corps noir, l'effet photo-électrique, ou l'existence des raies spectrales.

Parmi ces concepts, on peut citer la dualité onde corpuscule et l'amplitude de probabilité.

En physique quantique les objets microscopiques ou les OEM ont des niveaux d'énergie quantifiés et non continus comme en mécanique classique.

La figure d'interférence suivante est obtenue avec un faisceau d'électrons et deux fentes étroites.



Les photos a, b, c, d sont prises aux instants $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$.

La position de l'impact des électrons ne permet pas de déterminer la trajectoire des électrons. Cependant ils ont une probabilité d'impact en un lieu donné. Une zone sombre correspond à une faible probabilité d'impact, une zone claire à une forte probabilité d'impact.

Les particules du monde microscopique sont soumises à des lois probabilistes. Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir un comportement.

Les phénomènes quantiques présentent un aspect probabiliste. En effet, on peut au mieux établir la probabilité de présence d'une particule à un endroit donné.

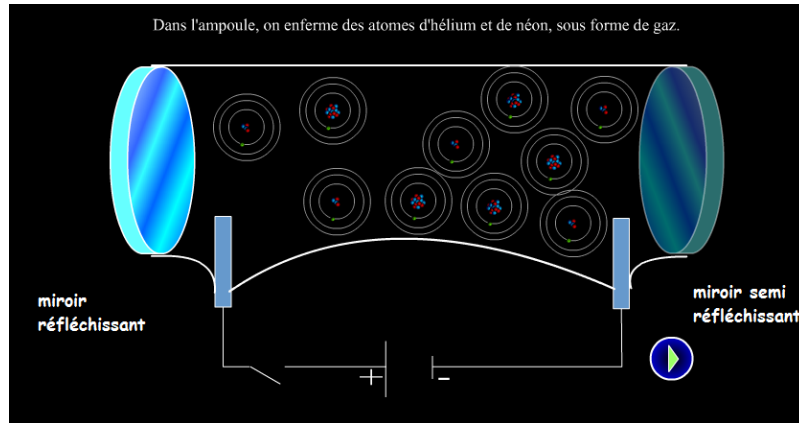
B- Le laser

Pour l'étymologie, le mot LASER est un acronyme anglais. Un laser est un dispositif permettant une amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement, soit en anglais, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

La définition courte qui revient souvent est la suivante: Dispositif émettant de la lumière très cohérente, grâce au processus d'émission induite.

1- Principe de fonctionnement

Un laser est constitué d'une ampoule dans laquelle on enferme un gaz par exemple du néon et de l'hélium. On introduit dans l'ampoule 2 électrodes reliées à une source de tension électrique. Un miroir réfléchissant est placé à l'une des extrémités du Laser, tandis qu'à l'autre extrémité on dispose d'un miroir semi-réfléchissant.

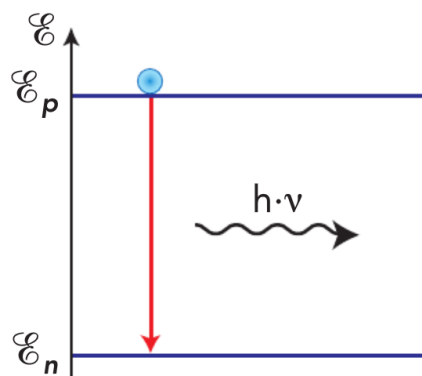


Cette source produit un courant d'électrons qui entre en collision avec les atomes d'hélium qui passe à un niveau d'énergie excité. L'atome d'hélium entre à son tour en contact avec l'atome de néon qui lui aussi s'excite. En se désexcitant l'atome de néon produit un photon. Ce photon en passant à proximité d'un autre atome de Néon excité génère une émission stimulée de photon.

Une partie des photons émis peut servir à exciter les atomes de Néon. Pour qu'il y ait amplification de l'onde lumineuse, il faut qu'il y ait plus d'atome de Néon excité que dans leur état fondamental. Cet état correspond à l'inversion de population, elle est réalisée à partir d'une opération appelée pompage optique.

2- Emission spontanée

Un atome peut émettre spontanément un photon quand il passe d'un niveau d'énergie \mathcal{E}_p à un niveau d'énergie inférieur \mathcal{E}_n .

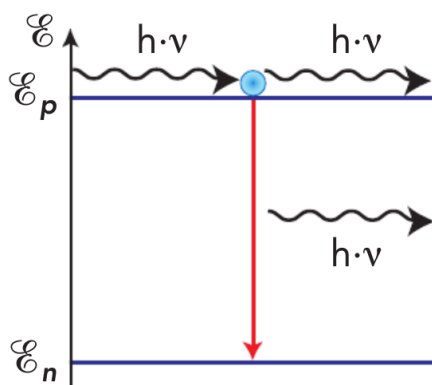


L'énergie de ce photon est telle que: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n = h \cdot \nu$

Cette émission a lieu de manière aléatoire, dans n'importe quelle direction de l'espace.

3- Emission stimulée

Un photon d'énergie $\mathcal{E} = h \cdot \nu$ peut forcer un atome initialement dans l'état excité d'énergie \mathcal{E}_p , à passer au niveau d'énergie inférieur \mathcal{E}_n . Ce passage s'accompagne d'un second photon de même énergie, de mêmes directions et sens de propagation et de même phase que le photon incident.



Lors d'une émission stimulée, un photon incident interagit avec un atome initialement excité et provoque l'émission d'un second photon par cet atome.

L'énergie du photon incident doit être égale à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie de cet atome.

Deux photons sont obtenus après émission stimulée: le photon émis et le photon incident. Ces deux photons ont même fréquence, même direction et sens de propagation et sont en phase.

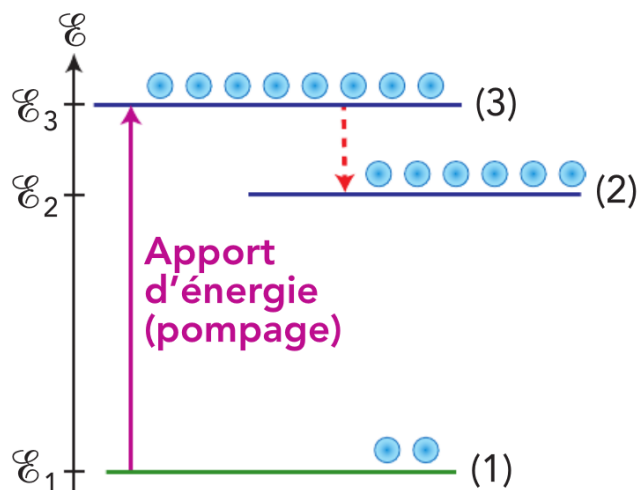
Des photons possédant la même fréquence et vibrant en phase sont appelés photons synchronisés ou cohérent.

4- L'inversion de population

Pour augmenter le nombre d'émissions stimulées, il faut qu'il y ait plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental, qui est l'état stable des atomes.

Dans la matière, une majorité d'atomes étant dans l'état stable, on leur transfère de l'énergie pour créer une inversion de population.

Le schéma ci-dessous représente la répartition d'une population d'atomes lors de cette inversion. L'apport d'énergie permet aux atomes de passer du niveau fondamental (1) à un niveau excité (3). Les atomes ne restent pas sur ce niveau, mais redescendent spontanément et très rapidement au niveau (2) où ils s'accumulent. La transition du niveau (2) au niveau (1) pourra alors se produire lors d'une émission spontanée ou stimulée.

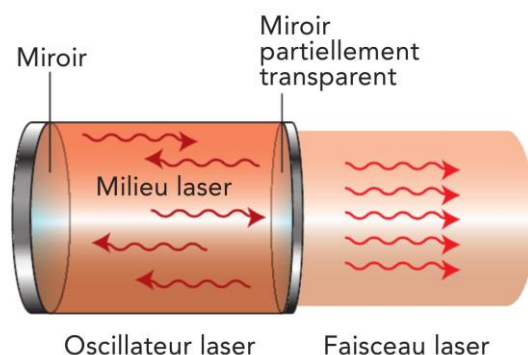


L'émission stimulée est favorisée par l'inversion de population qui consiste à maintenir plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental. Cette situation est obtenue grâce à un apport d'énergie.

5- L'amplification

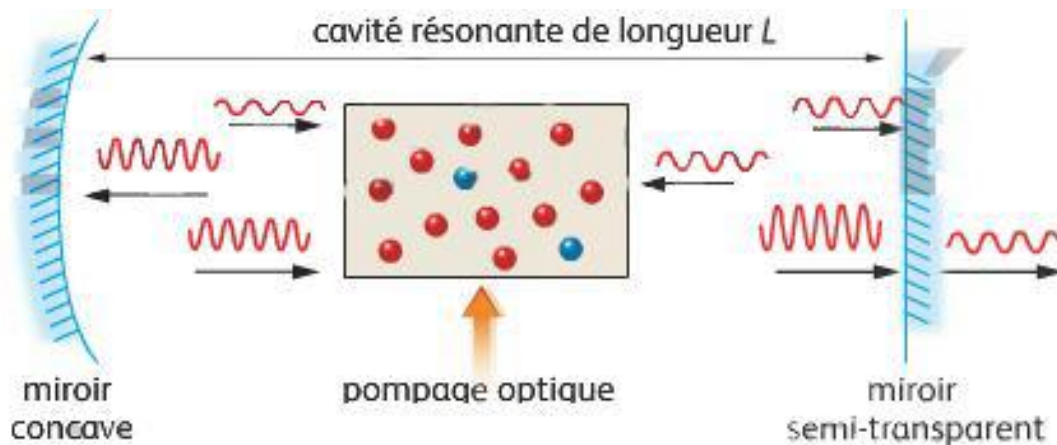
Une partie des photons traversent le miroir semi réfléchissant et produisent un faisceau unidirectionnel et très énergétique. L'autre partie est réfléchi et stimule la production d'autres photons.

Les réflexions successives des photons sur les miroirs constituent l'oscillateur laser.



Pour amplifier davantage l'onde, on peut lui faire parcourir un très grand nombre d'allers-retours dans le milieu actif. On réalise pour cela une cavité résonante à l'aide de deux miroirs: l'un est un miroir sphérique (concave) pour maintenir le faisceau sur l'axe de

symétrie du dispositif, et l'autre est un miroir semi-transparent pour transmettre à l'extérieur de la cavité une partie de la lumière.



Lors de leur aller-retour, les ondes associées aux photons et réfléchies par le miroir interfèrent dans la cavité. Ces interférences doivent être constructives, par conséquent la distance aller-retour entre les miroirs doit être un nombre entier de longueur d'onde: c'est l'amplification par effet laser.

Les interférences sont constructives si la longueur L de la cavité vérifie la relation $2L = k \cdot \lambda$ où λ est la longueur d'onde dans le milieu actif et k un entier non nul.

L'énergie rayonnée par le laser augmente avec l'amplification de l'onde dans la cavité résonante. Un régime stable s'installe dans la cavité optique lorsque l'énergie rayonnante devient égale à l'énergie fournie par le pompage optique. L'amplitude de l'onde est alors constante.

Le laser constitue un oscillateur optique entretenu, c'est à dire que l'énergie fournie par le pompage compense l'énergie perdue après émission.

6- Les principales propriétés du laser

Tous les photons émis par le laser ont la même fréquence. Un laser produit donc un faisceau lumineux monochromatique.

Ces photons sont aussi en phase. Un laser produit donc un faisceau lumineux cohérent.

Ces photons ont la même direction. Un laser produit donc un faisceau lumineux directif.

La puissance d'un faisceau laser, donc l'énergie est beaucoup plus concentrée dans l'espace dans le cas d'un laser que dans celui d'une lampe à incandescence. De plus, un laser à impulsions permet de concentrer dans le temps l'énergie grâce à des émissions de très courte durée.

Un laser émet un faisceau lumineux monochromatique très directif, ce qui permet une concentration spatiale de l'énergie. Les lasers à impulsion permettent de plus une concentration temporelle de l'énergie.

Avec des puissances allant du milliwatt au térawatt, le champ d'application des lasers est très vaste. On les utilise pour la lecture des codes-barres ou des disques optiques (CD, DVD, Blu-Ray Disc), le transport des informations par fibre optique, la détermination de distances, le nettoyage de surfaces, la chirurgie, etc....

C- Energie d'édifices microscopiques

La notion de niveau d'énergie s'applique à tout système microscopique dont il existe trois grands types:

- Les niveaux d'énergie électroniques (ces niveaux d'énergie sont déterminés dans le cas d'un atome seul, non liée avec d'autre atome).
- Les niveaux d'énergie nucléaire correspondant aux différents niveaux d'énergie du noyau (de l'ordre de la centaine de kilos électronvolt).
- Les niveaux d'énergie au sein d'une molécule.

1- Niveau d'énergie électronique d'un atome

Les différents niveaux d'organisation des électrons définissent également l'énergie propre à chaque électron en fonction de sa position.

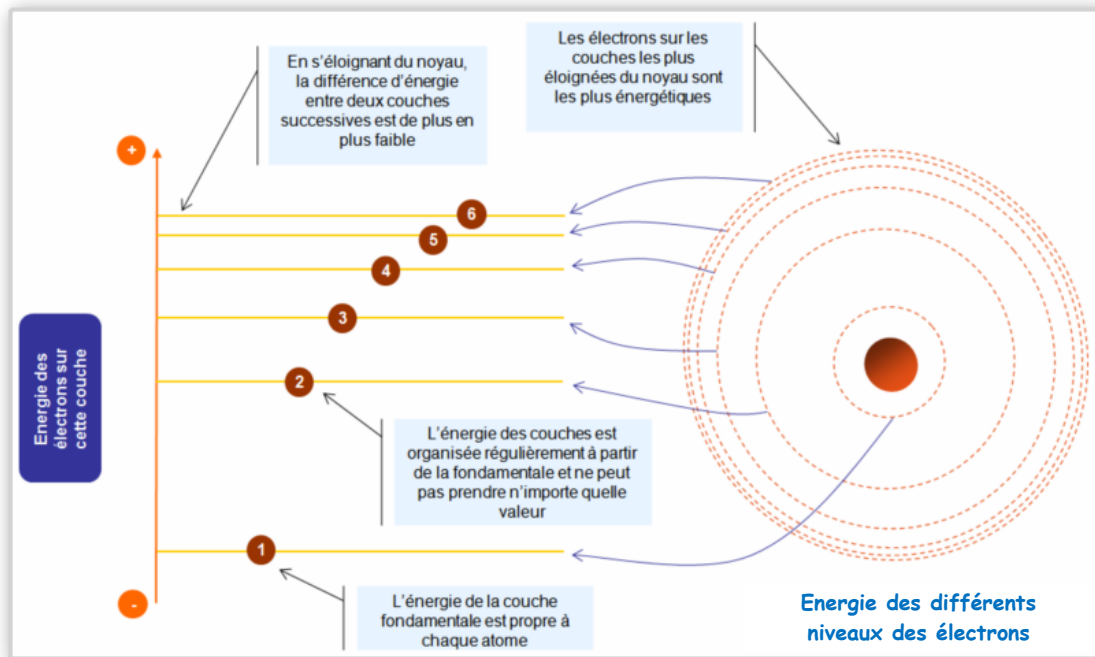
Chaque orbite (ou nombre quantique principal) correspond à un niveau d'énergie propre dont la valeur se détermine à partir d'une formule commune à tous les atomes, mais dont un des paramètres constants varie avec l'atome:

- Les niveaux les plus éloignés du noyau sont les plus énergétiques.
- La différence entre deux niveaux diminue très rapidement alors que l'on s'éloigne du noyau.

Les niveaux d'énergie pour un atome sont fixes et définis: ils ne peuvent pas prendre d'autres valeurs que ces valeurs-ci.

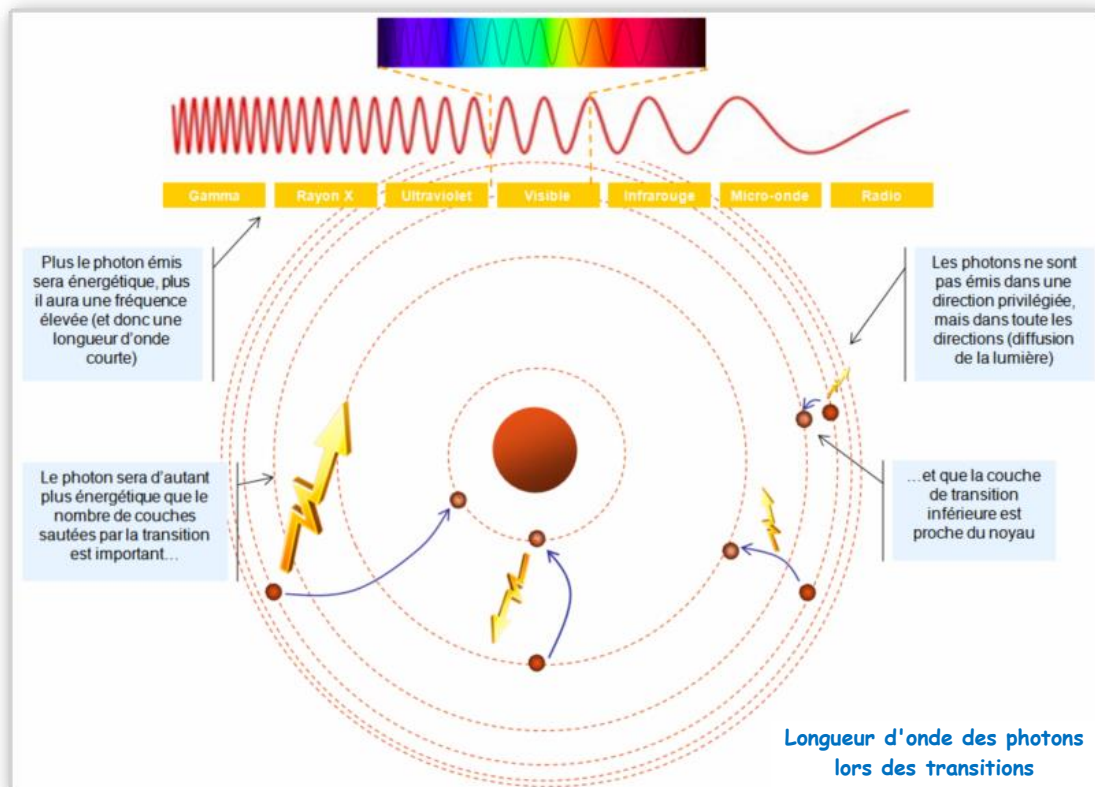
On peut les assimiler à un escalier ou chaque couche serait une marche: les électrons peuvent passer d'une marche à l'autre, mais ne peuvent pas s'arrêter entre deux marches.

Généralement, les schémas représentant les niveaux d'énergie d'un atome sont principalement basés sur l'atome d'hydrogène qui est assez simple à étudier du fait de son unique proton.

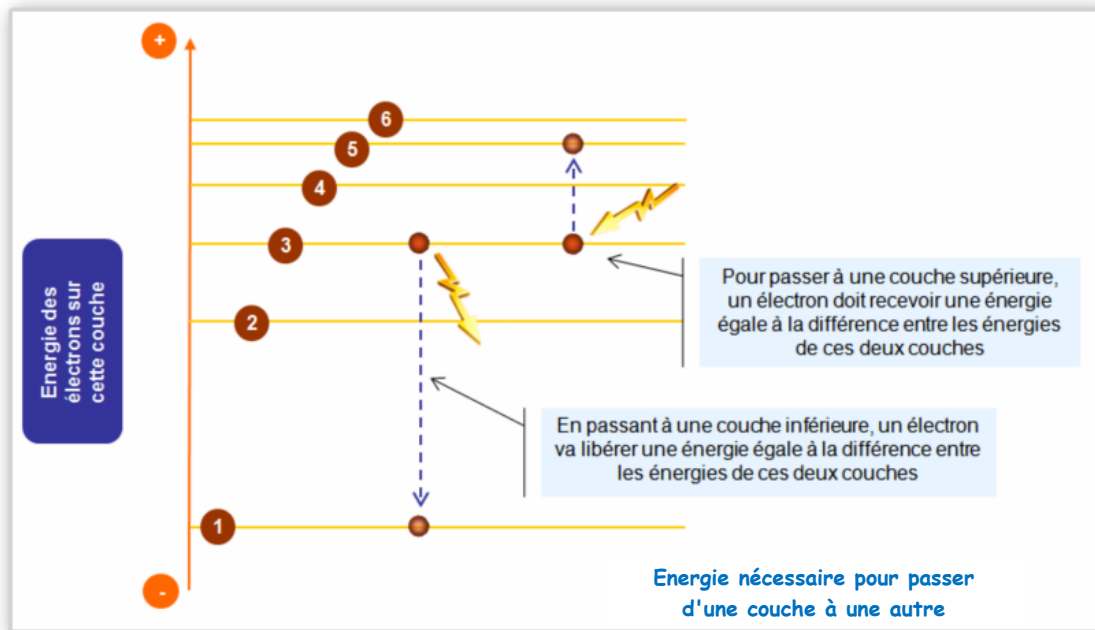


Les niveaux d'énergies exacts d'atomes plus complexes restent difficiles à calculer, mais le fonctionnement global reste le même.

Pour passer d'un niveau inférieur (moins d'énergie) à un niveau supérieur (plus d'énergie), il faut fournir de l'énergie à l'électron. L'énergie du photon est égale à la différence d'énergie entre le niveau initial et le niveau final. Cette énergie déterminera sa fréquence et donc si le photon émis sera visible, X, etc.



Inversement, en passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, l'électron libèrera de l'énergie sous la forme d'un photon le plus fréquemment.



L'énergie concernée est la différence entre l'énergie du niveau d'origine et celui de destination et sont donc des valeurs très précises et fixes pour chaque type d'atome et chaque transition possible entre les couches de ces atomes.

Un atome gagne ou cède de l'énergie en faisant transiter un électron d'un niveau d'énergie quantifiée E_n à E_p .

Lors d'une transition électronique, les atomes émettent ou absorbent des photons dans le domaine UV ($10^{-10}\text{m} < \lambda < 0,4 \cdot 10^{-6}\text{m}$) ou visible ($400\text{nm} < \lambda < 800\text{nm}$).

Par exemple, l'énergie ΔE (en eV) qui correspond à l'émission de la radiation de la raie jaune du doublet du sodium de longueur d'onde $\lambda = 589,0\text{nm}$ est:

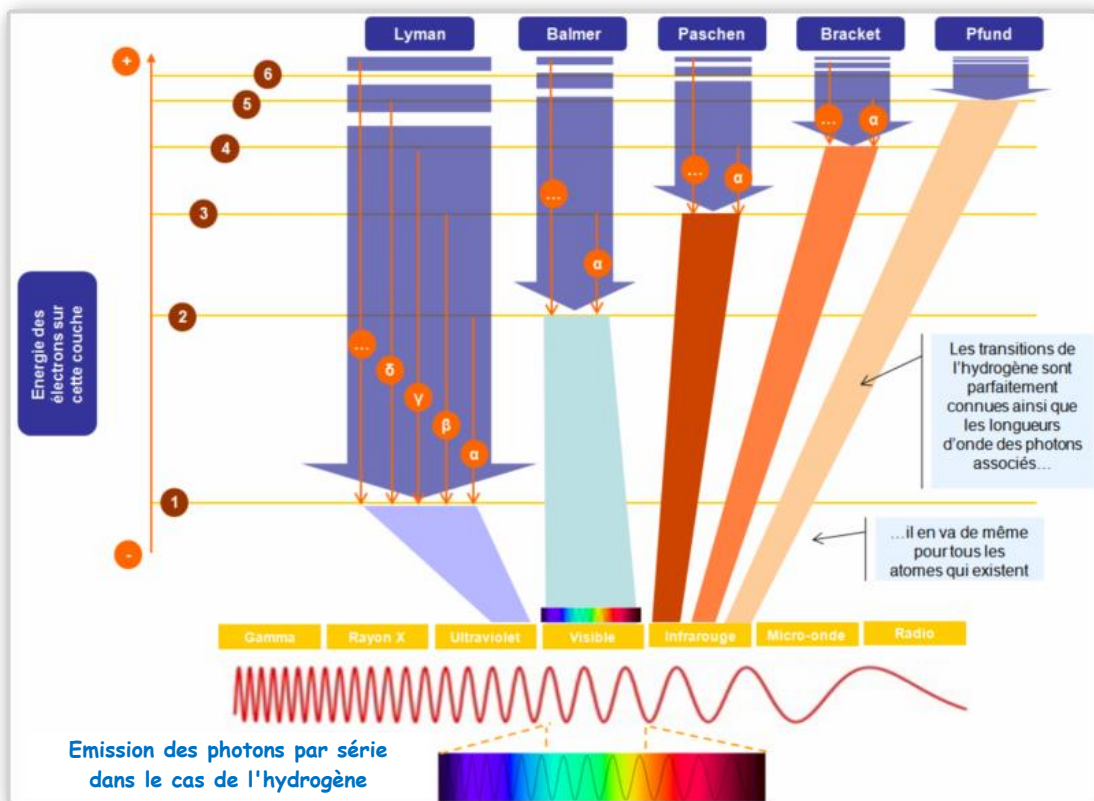
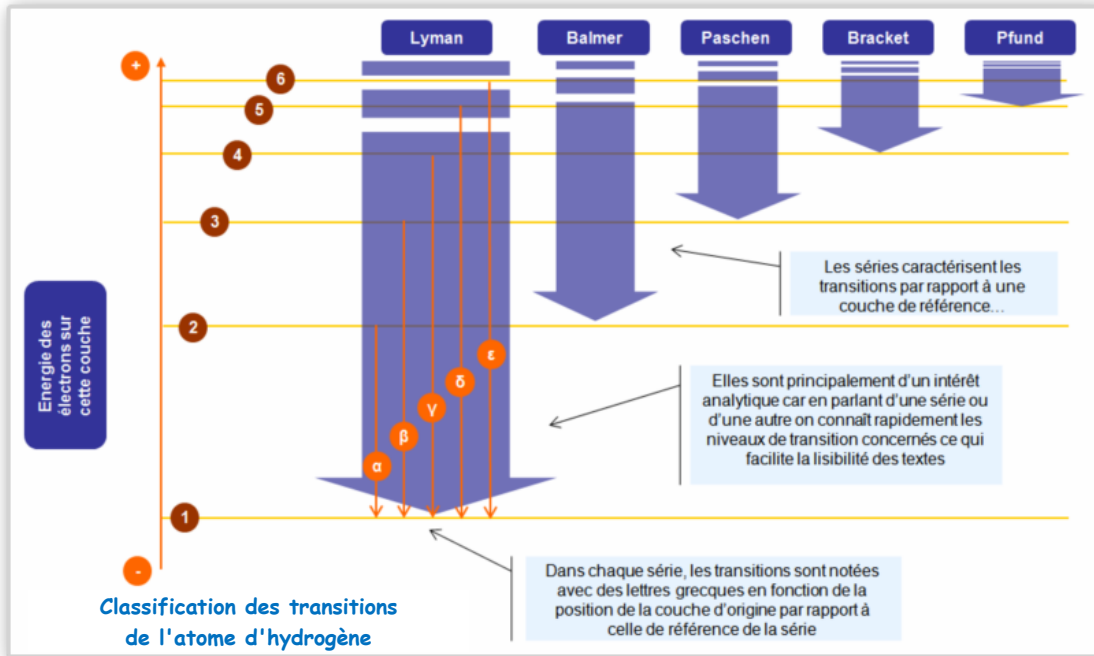
$$\Delta E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8}{589,0 \cdot 10^{-9}} = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{J} = 2,11 \text{eV}$$

Une classification existe, commune à tous les atomes, et qui permet rapidement de déterminer l'énergie des photons émis ou absorbés par les atomes.

Ces classifications se nomment des séries, et portent les noms des savants qui les ont caractérisées au cours des siècles précédents:

- Chaque série représente les transitions des niveaux supérieurs vers un même niveau inférieur.

- Les énergies concernées par ces transitions vers un même niveau inférieur sont dans une gamme spécifique (visible, ultraviolet, infrarouge, etc.).
- La transition entre le niveau de référence et le niveau immédiatement supérieur est noté α , avec le niveau du dessus β , etc.



Les séries basées sur les couches les plus proches du noyau sont les plus simples à étudier et on fait l'objet des premières analyses. C'est pourquoi ce sont les seules à porter un nom.

Les différentes séries de transition (Lyman, Balmer, etc.) permettent rapidement de déterminer les fréquences des photons émis et dans quel domaine se fera cette émission (ultraviolet, visible, infrarouge, etc.).

La connaissance de ces informations sert par exemple en astrophysique pour déterminer la nature des nuages qui nous séparent d'étoiles lointaines, et au quotidien pour déterminer la couleur que pourra émettre une ampoule à gaz.

L'énergie des différents niveaux quantiques principaux varie avec chaque atome du fait de sa structure ce qui a des conséquences sur sa capacité à interagir avec les autres atomes, mais surtout avec les différentes fréquences électromagnétiques.

Les énergies de transition étant de plus en plus faibles lorsque l'on considère des couches de plus en plus élevées, chaque série a une forme caractéristique où :

- La transition α est la moins énergétique.
- Les différences d'énergie entre deux couches élevées diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du noyau ce qui impose une limite pour chaque série qui est la tendance maximale vers laquelle tendront les photons émis par cette série.

2- Niveaux d'énergie au sein d'une molécule

On distingue quatre types d'énergie au sein d'une molécule :

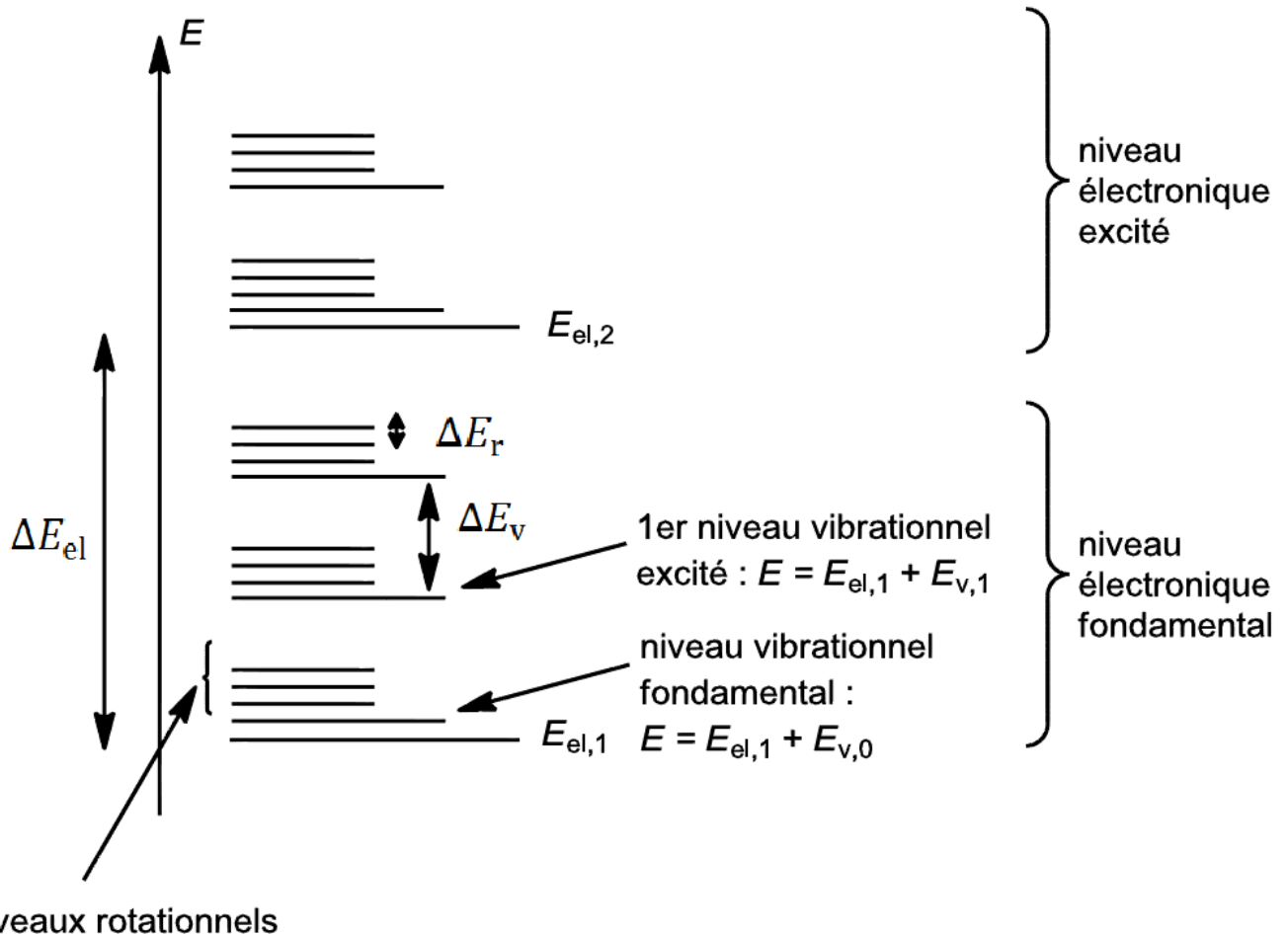
- L'énergie électronique $E_{\text{élec}}$ des électrons. Comme pour les rayonnements électroniques des atomes, les rayonnements émis se trouvent dans le domaine du visible et des UV.
- L'énergie de translation E_{trans} de la molécule.
- L'énergie vibrationnelle E_{vib} due aux oscillations des noyaux autour de leur position d'équilibre.
- L'énergie rotationnelle E_{rot} associée aux mouvements de rotation de la molécule autour d'un axe passant par le centre d'inertie.

L'énergie totale E de la molécule est donc :

$$E = E_{\text{élec}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{rot}}$$

Toutes ces énergies, sauf celle de translation, sont quantifiées et la différence entre deux niveaux électroniques, vibrationnels ou rotationnels ne sont pas du même ordre de grandeur :

$$\Delta E_{\text{élec}} < \Delta E_{\text{vib}} < \Delta E_{\text{rot}}$$



Le schéma ci-contre représente les différents modes de vibration d'une molécule d'eau. La transition entre deux niveaux d'énergie de vibrations correspond à 1/10 d'électronvolt environ.

Une transition d'énergie vibratoire est associée à une radiation infrarouge.

La transition entre deux niveaux d'énergie de rotation et de l'ordre du milli électronvolt. Les longueurs d'onde correspondantes font partie de l'infrarouge lointain.

Cette méthode est utilisée pour déterminer la structure moléculaire d'une substance par spectroscopie infrarouge.

