Notions de physique quantique

La mécanique classique et l'électromagnétisme permettent d'expliquer beaucoup de choses, cependant certains phénomènes restent inexplicable à partir de ces théories, notamment :

- ✓ Le rayonnement du corps noir
- ✓ L'effet photoélectrique
- ✓ La stabilité des atomes et les spectres de raies

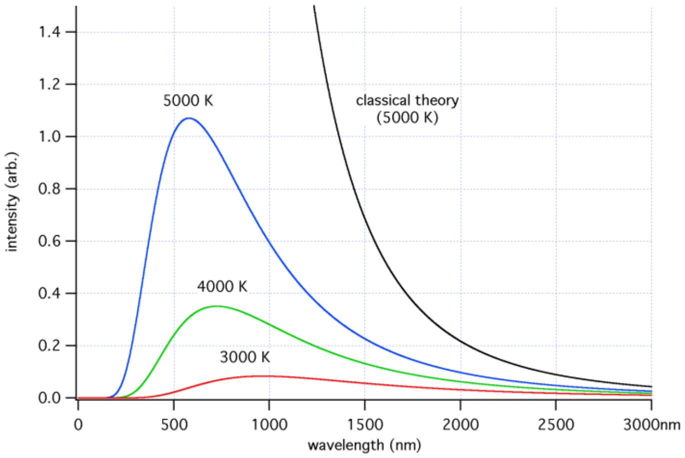
C'est pour donner une explication à ces phénomènes qu'est née la physique quantique.

I. Le corps noir

Un **corps noir** est un système composé de plusieurs constituants élémentaires (= atome et molécules) dont le **spectre électromagnétique** ne dépend que de sa **température**.

A. La théorie du corps noir

Expérimentalement, on observe qu'un corps chauffé à une température T émet un **spectre continu** de rayonnement électromagnétique. La puissance émise par unité de surface augmente rapidement avec T, impliquant des longueurs d'onde de plus en plus faibles.



Pour mesurer les caractéristiques des ondes électromagnétiques on va utiliser un **détecteur** capable d'enregistrer les **longueurs d'onde** (λ) des rayonnements échangés entre les différents constituants du système. Ce détecteur va ensuite assimiler à chaque λ possible l'**énergie** correspondante.

On obtient un **spectre continu** car chaque constituant élémentaire va **émettre des ondes** avec une λ et donc une **énergie variable**. Pour une température donnée, on aura un maximum de rayonnements possédant une même énergie : on aura donc une **émission maximale** pour une **longueur d'onde** donnée.

Exemple :

Prenons la **courbe bleue** (à 5000K), on a **un maximum d'intensité** pour une longueur d'onde **λ = 600 nm**, ce qui signifie que la **majorité des constituants élémentaires** émettent des rayonnements dont λ vaut **600 nm**, donc ici dans le domaine visible. On voit d'après la courbe noire que ce n'est pas ce que prévoyait la **théorie classique**.

B. La loi du déplacement de Wien

Pour relier la température du système à la longueur d'onde maximale λ_{max} (= λ pour laquelle on a le maximum d'intensité), on utilise la loi du **déplacement de Wien** :

$$\lambda_{max} \times \mathbf{T} \cong \mathbf{0,29\ cm.K}$$

Attention unités :

λ s'exprime en cm
T s'exprime en Kelvin

On remarque que λ_{max} **diminue avec la température !**
Donc pour des **températures élevées**, on verra des **couleurs froides**, pour de **faibles températures**, des **couleurs chaudes**. Plus le pic maximal du spectre se déplace vers la gauche plus la température du corps noir augmente, vers plus de petites longueurs d'onde d'où le nom de loi de déplacement. L'utilisation de la loi de Wien se retrouve en particulier pour la lumière créée par **une étoile**.

Exemple 1 : Le soleil

On considère que le soleil se comporte comme **un corps noir**.

La température du soleil est d'environ 5750 K, donc on a son maximum d'intensité pour un rayonnement électromagnétique λ = 504 nm (vert-jaune). Néanmoins la lumière émise par le soleil nous apparaît blanche puisqu'il s'agit d'un **spectre continu composé de beaucoup de longueur d'onde !**

Exemple 2 : Le corps humain

En prenant une température moyenne de 37 °C, on se rend compte que le corps humain émet un rayonnement avec un maximum d'intensité pour λ = 10 µm (infrarouge).

C. Notion de quantum d'énergie

Planck fit l'hypothèse que les constituants élémentaires du corps noir ne pouvaient **absorber ou émettre de l'énergie** électromagnétique que par des **quantités discrètes minimales** : l'énergie transférée doit être un multiple de $h\nu$

L'énergie minimale qui peut se transmettre se nomme : **quantum d'action.**

On remarque que même pour de **petites longueurs d'onde** (= fréquence élevée) les **quantités d'énergies** échangées restent **faibles** car elles doivent être multiple de la **constante de Planck** qui vaut : $h = 6,62.10^{-34}$ **J.s.**

Avec :

h : la constante de Planck
ν : la fréquence en Hz
E : l'énergie en J ou eV
ω : la pulsation en rad.s^{-1}

Einstein va apporter quelques modifications à la thèse de Planck : selon lui, le rayonnement électromagnétique en lui-même n'existe pas. Ce sont des « **paquets d'ondes** », qu'il appelle des **quanta de rayonnement** qui sont responsable de ces **transferts d'énergie**. Ces quanta de rayonnement seront appelés par la suite « **photons** ».

On peut donc dire que $E = h\nu = \hbar\omega$ avec $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$

On introduit ici le lien entre un rayonnement purement ondulatoire et la notion de particule de lumière. (cf. Dualité onde-corpuscule plus loin).

Récapitulatif :

Corps noir : spectre continu avec un maximum qui dépend de la température

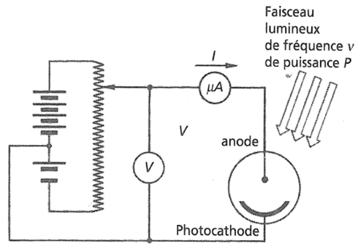
La **théorie classique** n'explique pas le phénomène de corps noir

Quand la **température augmente,** λ_{max} **diminue** donc l'énergie augmente

L'énergie est transférée via des quantités discrètes : les **quanta d'énergie**

II. L'effet photoélectrique

A. Définition



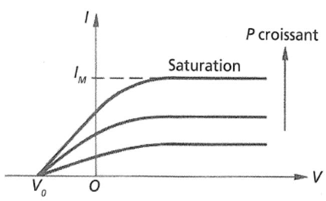
Certains **matériaux**, lorsqu'on les éclaire avec un certain **rayonnement** de **fréquence v**et de **puissance P**, vont émettre des **électrons**. Ces matériaux sont appelés des **photocathodes.** Sur le schéma à gauche on a ce qu'on appelle une cellule photoélectrique c'est à dire une photocathode dans tube à vide + anode destinée à récolter les électrons.

Ainsi, lorsqu'on éclaire une photocathode, des **électrons sont arrachés** puis **récoltés sur une anode** (positive) donc un mouvement d'électrons apparait, ce qui va créer un **courant d'électron**. Ce courant d'électron va donner un **courant d'intensité I** qui circule dans le sens contraire à celui des électrons (par convention).

B. Application d'une tension

Si on génère une **tension V** positive (donc une différence de potentiel positive) dans ce circuit, on va augmenter la **vitesse des électrons** et donc favoriser leur passage vers l'anode : on **renforce le courant**. En effet, on sait qu'un électron qui remonte une différence de potentiel de 1 volt acquiert une énergie cinétique de 1 eV donc le voltage de la tension se rajoute à l'énergie cinétique de l'électron à raison de 1 eV pour 1 volt.

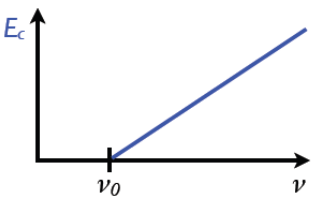
Ainsi, pour une **tension nulle**, on remarque un **courant I non nul**. Lorsque la **tension augmente**, le **courant I augmente** également jusqu'à atteindre un plafond : c'est le **courant de saturation** I_m.



Pour obtenir un **courant nul** (= les électrons sont arrêtés) et annuler l'effet photoélectrique, il faut appliquer une **tension négative** V_0. Son module $|V_0|$ représente la **contre-tension maximale** à partir de laquelle **plus aucun courant** ne passe.

(Ndlr : La tension V_0 est négative, mais lorsqu'on parle de la contre-tension maximale, on prend la valeur absolue)

Cette **contre-tension maximale** va donc nous permettre de mesurer **l'énergie cinétique des électrons** initialement arraché en utilisant la loi de conservation de l'énergie. Au départ on a une **énergie cinétique non nulle**. Lorsqu'on atteint la **contre-tension maximale**, toute l'énergie cinétique de l'électron s'annule avec la différence de potentielle.



Si on s'intéresse maintenant à l'évolution de **l'énergie cinétique** en fonction de la **fréquence** du rayonnement incident, on obtient une droite affine (= droite ne passant pas par l'origine). A partir d'une **fréquence seuil** ν_0, plus la **fréquence** du rayonnement incident est **élevée**, plus **l'énergie cinétique** sera **importante** proportionnellement (et non le nombre d'électrons !)

L'expression de **l'énergie cinétique** est : $E_c = h\,\nu - W$

W représente le **travail d'extraction**, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour arracher un électron de la photocathode. Le **travail d'extraction** dépend donc du matériau utilisé, et s'exprime : $W = h\nu_0$

W représente donc simplement **l'énergie de liaison** de l'électron au matériau.

Ainsi, lorsque les électrons reçoivent une **quantité d'énergie** hν supérieure au **travail d'extraction**, l'électron va être arraché de la photocathode, et expulsé avec **une énergie cinétique** E_c.

> **Remarque :**
>
> **On retrouve la constante de Planck initialement calculée pour la théorie du corps noir !**

C. Le courant (++)

Le **courant** représente le **nombre d'électrons** qui circulent dans le circuit. L'intensité du courant généré **augmente** avec **la puissance** du rayonnement incident qui s'exprime : $\mathbf{P = n \times E}$.

> **Avec :**
>
> n : le nombre de photons
> E : l'énergie de chaque photon en J
> P : la puissance en Watt

La **puissance** de la lumière sur la photocathode varie en fonction du **nombre de photons** et de leur **énergie**, mais il est plus simple de faire varier le **nombre de photons** que leur énergie lorsque l'on utilise une source lumineuse.

De même, **l'intensité lumineuse** va également influencer le **courant** : une **augmentation de l'intensité lumineuse augmente le courant**, c'est-à-dire qu'elle augmente le nombre d'électrons qui vont circuler (et non leur énergie !)

Le **courant augmente** aussi lorsqu'on applique une **tension**, jusqu'à un courant maximum : le **courant de saturation (I_m).**

Explication :

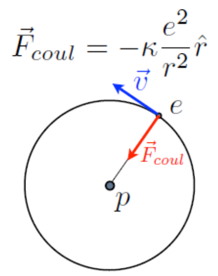
En fait, le rayonnement est capable d'arracher un certain nombre d'électrons de la photocathode et la **tension** va **augmenter la vitesse** à laquelle se déplace les électrons, du coup, **l'anode va les récolter plus rapidement**. Lorsque la **tension** devient **très élevée**, **l'anode collecte très rapidement** les électrons, à tel point que tous les électrons arrachés par le rayonnement seront collectés : le courant atteint son maximum, c'est le **courant de saturation (I_m).**

Récapitulatif :

> Un rayonnement lumineux peut **arracher les électrons** de certains matériaux : les **photocathodes**
>
> Les électrons sont **récoltés par une anode**
>
> Pour arracher des électrons, il faut que l'**énergie** du rayonnement soit **supérieure** à **l'énergie de liaison des électrons** (= supérieur **au travail d'extraction**)
>
> Il y a création d'un **courant I** qui **augmente** avec :
> - ✓ **La puissance du rayonnement**
> - ✓ **L'intensité lumineuse**
> - ✓ **La tension** jusqu'à un maximum
>
> Une **augmentation du courant** veut dire qu'on **augmente le nombre d'électrons**
>
> On peut utiliser une **contre tension négative** pour **annuler le courant** et **arrêter les électrons**
>
> La **contre tension** permet de retrouver **l'énergie cinétique** des électrons
>
> On retrouve l'importance de **l'aspect corpusculaire** du rayonnement électromagnétique

III. Stabilité et spectre des atomes

A. Le modèle de Rutherford



Lorsque l'on découvre l'électron, on commence à comprendre que la matière est formée d'atomes, eux même constitués d'électrons qui gravitent autour d'un noyau. Ils imaginent donc un **modèle planétaire** où l'électron tourne autour du noyau, sauf que cette fois on ne prend pas en compte la force gravitationnelle, mais la **force de coulomb** qui décroit également en $\frac{1}{r^2}$.

Néanmoins, ce modèle possède une limite : il **n'explique pas le spectre de raies** atomique observé expérimentalement.

Explication :

Selon **les lois de l'électromagnétisme**, une charge ponctuelle subissant une accélération (centripète si le mouvement est uniforme) doit rayonner, et donc **perdre de l'énergie par rayonnement**. Si l'électron perd de l'énergie, il devrait se rapprocher du noyau jusqu'à s'écraser dessus, mais on voit que ce n'est pas le cas.

D'autre part, selon la **loi de Kepler**, on aurait dû avoir un **spectre continu**, mais on se retrouve avec **un spectre de raie.**

Exemple : spectre de l'hydrogène

Suite à l'analyse du **spectre de l'hydrogène**, on remarque **trois raies** dans le domaine du visible (rouge, bleu, violette).

Il y a également d'autres raies dans le domaine des UV et des IR. **Balmer** a travaillé dans le domaine du **visible**, **Lymer** dans l'**UV** et **Paschen** dans l'**IR.**

Ce **spectre discontinu** (= de raies) est donné par :

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R_H\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Avec :

m : un entier plus petit que n
n : un entier plus grand que m
R_H : la constante de Rydberg

B. Le modèle de Bohr

Bohr va proposer un nouveau **modèle de quantification** en posant deux hypothèses :

✓ Seules **certaines orbites sont autorisées** pour les électrons
✓ Lors du passage d'une orbite à l'autre, il y a **absorption ou émission de photon**.

Rappel :

Le moment cinétique (= moment angulaire) : grandeur vectorielle décrivant l'état général de rotation d'un système autour d'un axe.

En appliquant **l'hypothèse de Bohr** selon laquelle le **moment cinétique** de l'électron est un multiple de $\hbar$ et en combinant la théorie classique (voir démonstration du cours) on obtient :

$$E_n = -E_H\frac{1}{n^2}$$

Avec :

n : un entier
E_H : une constante (13,6 eV)

Ainsi, en partant de l'hypothèse que le **moment cinétique est un multiple de $\hbar$,** Bohr a retrouvé l'équation rendant compte de l'énergie de l'atome d'hydrogène. On voit que seules **certaines énergies sont permises.**
De la même manière, seules **certaines orbites sont permises** et sont un multiple de $\hbar$.

Lorsqu'un électron passe d'une orbite à une autre, il y a **absorption ou émission de photon**. Les énergies des orbites étant quantifiées, **les photons** émis ou absorbés seront donc **quantifiés** eux-aussi et correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

Dans ces conditions, l'énergie du photon émis ou absorbé vaut : $h\nu = E_m - E_n$

L'hypothèse de Bohr apporte également la **solution** quant aux **raies émises par l'atome d'hydrogène**, et permet de retrouver l'équation donnant les raies de l'hydrogène.

Récapitulatif :

L'**hypothèse de Bohr** est donc une hypothèse de **quantification** :
✓ Le **moment cinétique** des électrons est **quantifié**, ce qui implique que **l'énergie** des électrons autour des orbites est **quantifiée** également

L'hypothèse de Planck est également une hypothèse de **quantification** :
✓ **L'énergie du photon** d'un rayonnement électromagnétique est **quantifiée**

L'électron ne rayonne aucune énergie lorsqu'il se trouve sur une orbite stable donc quantifiée sauf quand l'électron change d'orbite.

Rappel :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{E}{h}$$

C. Dualité onde-particule

De Broglie propose d'étendre le concept de dualité onde particule au-delà du photon, à toute particule de matière. A une particule de quantité de mouvement p, il associe une onde de longueur d'onde λ tel que **$\lambda = h / p$** avec p la quantité de mouvement (p = m × v). Cette hypothèse s'applique par exemple aux électrons avec lesquels on doit pouvoir observer le phénomène de diffraction comme pour les ondes électromagnétiques.

Exemple cours : électron accéléré sous une différence de potentiel de 100 volts

$$\begin{aligned}\lambda &\simeq \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2eVm}} \\ &= \frac{6,6\times10^{-34}}{\sqrt{2\times|1,6\times10^{-19}\times100\times9,1\times10^{-31}}} \\ &= 1,2\times10^{-10}\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

L'ordre de grandeur de la λ d'un électron correspond à la taille d'un atome (10^{-10} m). C'est pourquoi lorsque l'électron rencontre un obstacle de l'ordre de la taille d'un atome, on peut observer des **phénomènes de diffraction**. La diffraction correspond à une onde qui ne se propage plus dans un faisceau, mais se disperse. On observe une diffraction lorsque une longueur d'onde λ rencontre un **obstacle de même ordre de grandeur ou légèrement plus grand**.

Pour une fente de taille a, il faut que $\boldsymbol{p \times a \leq h}$ pour avoir diffraction.

Récapitulatif :

La **mécanique classique** n'explique pas le **spectre de raie**

Le **spectre de l'hydrogène** est analysé par :
- ✓ **Balmer** dans le **visible**, avec trois raies : **bleue, rouge** et **violette**
- ✓ **Lymer** dans l'**UV**
- ✓ **Paschen** dans l'**IR**

Le **spectre de raie** est expliqué grâce à la mécanique quantique

Le **modèle de Bohr** introduit deux hypothèses :
- ✓ Seules **certaines orbites** sont **autorisées**
- ✓ Lors d'un changement d'orbite, il y a **émission ou absorption** d'un photon **d'énergie quantifiée**

Un **électron** peut avoir un comportement **ondulatoire**, sa λ dépend alors de sa **quantité de mouvement**

Pour plus de **stabilité**, la **circonférence d'une orbite** autorisée est un **multiple de la** λ de l'électron

IV. Fonction d'onde et équation de Schrödinger stationnaire

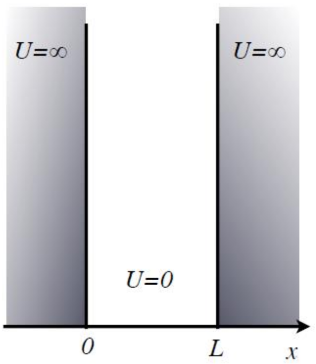
On cherche à décrire l'onde associée à une particule (ici l'électron). Par exemple, une onde électromagnétique est caractérisée par un champ électrique et un champ magnétique qui vibre en phase.

Schrödinger va proposer une **fonction d'onde** (= fonction complexe permettant de connaitre **l'amplitude de probabilité**, c'est-à-dire l'évolution de la probabilité de trouver la particule dans un certain volume autour d'un point) pour **caractériser l'onde** associée à une particule.

Cas particulier : le système stationnaire

On considère qu'un **système est stationnaire** lorsque son **énergie est conservée**. Dans cette situation, on obtient une **équation indépendante du temps**, on ne s'intéresse qu'à la composante spatiale de l'onde.

A. Le puit plat infiniment profond



On s'intéresse à une **particule** qui obéit à l'équation de Schrödinger et se **comporte donc comme une onde.** On va l'obliger à rester dans une zone bien définie : une **zone de confinement**. Cette zone est entourée par deux murs infranchissable dont **l'énergie potentielle tend vers l'infini**, on retrouve deux bornes pour $x = 0$ et $x = L$.

L'énergie potentielle étant liée à une force, cela signifie qu'il y a une **force qui empêche la particule de sortir de la zone.**

On suppose également que **l'énergie potentielle** de la particule **est nulle dans cette zone** (elle est complètement libre).

Lorsque la particule se situe au niveau des **bornes**, **la fonction d'onde s'annule**.

La **largeur de la zone** de confinement conditionne la **longueur d'onde** qu'aura la particule et indirectement (démonstration dans le cours), elle conditionnera les **énergies permises** (en simplifiant, E_1 étant l'état fondamental) que l'on exprime:

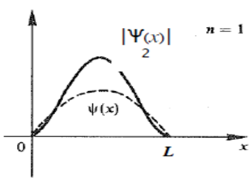
$$\boldsymbol{E_C = n^2 E_1}$$

Ainsi les niveaux d'énergies permis pour la particule confinée dans la boîte ne sont pas des niveaux continus, sont donc séparés comme **les carrés** des nombres entiers… Et sont de plus en plus **resserrées** au fur et à mesure que **l'énergie augmente** comme on va le voir justement en-dessous et que **le système devient de plus en plus macroscopique**.

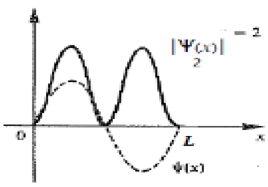
B. Interprétation probabiliste de la quantique

La fonction d'onde représente une amplitude de probabilité, et donc indirectement, une probabilité. On voit que l'interprétation de la mécanique quantique se fait de manière probabiliste.

D'après la précédente formule, on comprend qu'on obtient des courbes reflétant la probabilité de trouver la particule à un certain endroit :



Pour $n = 1$, (état fondamental) on voit que l'on a le plus de chance de retrouver la particule au centre



Pour $n = 2$, (état excité) on la retrouvera plutôt sur les côtés, mais très peu au centre

Récapitulatif :

La **fonction d'onde** caractérise une onde associée à une particule, et représente **indirectement une probabilité**

On peut enfermer une particule dans une zone entre deux murs infranchissables :

- ✓ Dans la **zone**, **l'énergie potentielle de la particule est nulle**
- ✓ Les **murs** ont une **énergie potentielle** qui **tend vers l'infini**

La **fonction d'onde s'annule sur les bornes** de la zone

La **largeur de la zone de confinement conditionnera la λ** de la particule et son énergie

En partant de la **fonction d'onde**, on peut prédire la **probabilité** de trouver la particule à un endroit donné

La **mécanique quantique est probabiliste**

V. La relation d'incertitude d'Heisenberg

A. La limitation fondamentale

A partir de l'équation de Schrödinger, on peut déduire un autre principe : **le principe d'incertitude de Heisenberg**. Si on a une certaine incertitude sur la mesure de la position Δx, on aura une certaine incertitude sur la vitesse et donc sur la quantité de mouvement Δp, telle que :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Cela signifie que dans un faisceau de particules, **si on essaie de déterminer de façon précise la vitesse des particules, on n'aura AUCUNE possibilité de décrire précisément la position de la particule.**

Inversement, **si on connaît très bien la position de la particule**, cela signifie que Δp est très grand et donc on aura une **très grande imprécision sur la vitesse**…

Une relation semblable fait correspondre les incertitudes Δt sur la mesure du temps et ΔE sur la mesure de l'énergie d'une particule.

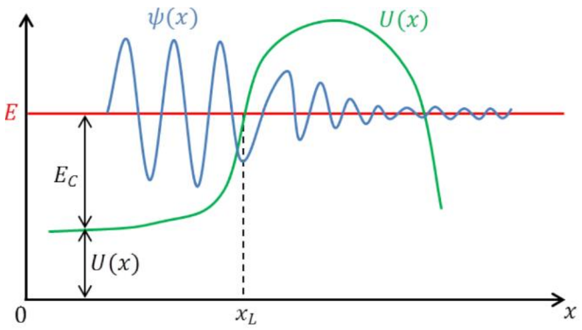
VI. Effet tunnel et microscopie

A. L'effet tunnel

D'après la théorie de la mécanique classique, lorsqu'une particule rencontre une « **barrière d'énergie potentielle** » plus importante que sa propre énergie, elle **ne peut pas la traverser**, elle va s'arrêter au niveau de la barrière et éventuellement repartir dans l'autre sens.

En **mécanique quantique**, on voit que ce n'est pas le cas : il existe une certaine **probabilité** pour que la masse se retrouve de **l'autre côté de la barrière d'énergie potentielle**

La **probabilité P** qu'une particule **passe une barrière d'énergie potentielle** est proportionnelle à la **largeur de la barrière**, mais également à **la longueur d'onde** de la particule :



Pour traverser, la particule va sacrifier en échange une partie de l'amplitude de sa fonction d'onde.

$$P \propto \exp(-2\delta/\lambda_0)$$

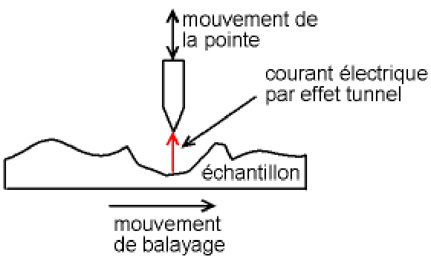
Avec :

E : l'énergie de la particule
δ : la largeur de la barrière
λ : la longueur d'onde

B. Le microscope à effet tunnel (résolution spatiale : atome)

Prenons la probabilité qu'un électron traverse une barrière d'énergie potentielle, même si cette probabilité est de l'ordre du millionième, comme on retrouve plusieurs milliards d'électrons dans la matière, il y aura en moyenne mille électrons qui vont franchir cette barrière.

C'est ce phénomène qui est exploité dans la **microscopie à effet tunnel**.



Fin de cette fiche de mécanique quantique, en espérant qu'elle facilitera vos révisions ! ♥