Université M'Hamed Bougara, Boumerdès
Faculté des Sciences
Département de Chimie

L1 ST-2021/2022

Série de TD N°2, Structure de la matière

Structure électronique de l'atome

Exercice 1

Le spectre d'émission de l'atome de mercure comporte cinq raies :

$$\lambda_1 = 0{,}615\ \mu m,\ \lambda_2 = 0{,}589\ \mu m,\ \lambda_3 = 0{,}568\ \mu m,\ \lambda_4 = 0{,}515\ \mu m,\ \lambda_5 = 0{,}498\ \mu m.$$

1. À quel domaine du spectre électromagnétique appartiennent-elles ?
2. Ce spectre est-il continu ou discontinu ? Expliquer.
3. Quelles sont parmi ces radiations, celles que l'atome de mercure peut absorber ? Expliquer.

Exercice 2

Soumis à une radiation, l'atome d'hydrogène émet des rayonnements, il présente un spectre de raies.

1. Citer 3 séries de raies appartenant respectivement au domaine de l'ultra-violet, du visible et de l'infrarouge.
2. À quel niveau se trouve l'électron après émission de raies dans le domaine du visible ?
3. Calculer la longueur d'onde de la première raie et de la raie limite de ces séries.
4. Représenter ces raies dans un diagramme énergétique et les nommer précisément.
5. Calculer en eV et en J, l'énergie nécessaire pour ioniser un tel atome pris dans son état stable.

Donnée : $R_H = 1{,}097 \cdot 10^{7}\ m^{-1}$

Exercice 3

Un hydrogénoïde ${}_{Z}X^{y+}$ absorbe dans son état stable un rayonnement. Sachant que son énergie d'ionisation est égale à 54,4 eV.

1. De quel hydrogénoïde s'agit- il ?
2. Calculer la longueur d'onde (en nm) de la radiation qui permettrait d'arracher cet électron.
3. Calculer l'énergie totale de cet électron s'il est dans son second état d'excitation.
4. Calculer le rayon de l'orbite et la vitesse de l'électron quand il se trouve au niveau n = 3.
5. Montrer que l'absorption d'un photon de nombre d'onde $\overline{\nu} = 1{,}56 \cdot 10^{8}\ m^{-1}$ par l'hydrogénoïde Be^{3+} à l'état fondamental est possible. Préciser le niveau énergétique de l'électron dans l'ion excité résultant de cette absorption.

Données : $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$; $c = 3 \cdot 10^{8}\ m/s$; $R_H = 1{,}097 \cdot 10^{7}\ m^{-1}$; $a_0 = 0{,}53$ Å ; $1\ eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J$

Exercice 4

1. **Quelle est la longueur d'onde associée à :**
   - un électron dont l'énergie cinétique est de 54 eV ?
   - un proton accéléré sous une différence de potentiel de 10^6 V ?
   - un avion de chasse de 15 tonnes volant à 2800 km/h ?
2. Dans quel(s) cas les propriétés ondulatoires se manifestent-elles ?
3. Appliquer le principe d'incertitude de Heisenberg et calculer l'incertitude sur la vitesse Δv_x de :
   - un électron se déplaçant en ligne droite (Δx = 1Å),
   - une bille de masse 1g se déplaçant sur une droite dont la position est connue à 1 mm près.
4. Quelle conclusion en tirez-vous ?

Données : $m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ *kg ;* $m_p = 1{,}672 \cdot 10^{-27}$*kg ;* $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$*J.s ;* $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *C.*

Exercices supplémentaires

Exercice 1

Un atome d'hydrogène initialement à l'état fondamental absorbe une quantité d'énergie de 10,2 eV.

À quel niveau se trouve-t-il alors ?

Réponse : $n_f = 2$

Exercice 2

Un atome d'hydrogène initialement au niveau n = 3 émet une radiation de longueur d'onde λ = 1027 Å.

À quel niveau se retrouve-t-il ?

Réponse : $n_f = 1$

Exercice 3

Pour passer du niveau d'énergie n = 2 au niveau n = 4, l'électron d'un atome d'hydrogène absorbe un photon de longueur d'onde λ. Calculer λ.

Réponse : $\lambda = 4{,}867 \cdot 10^{-7}$ m = 486,7 nm

Exercice 4

Si un atome d'Hydrogène dans son état fondamental absorbe un photon de longueur d'onde λ_1 puis émet un photon de longueur d'onde λ_2. Sur quel niveau l'électron se trouve-t-il après cette émission ?

λ_1 = 97,28 nm et λ_2 = 1879 nm.

Réponse : $n_f = 3$

Exercice 5

Un photon de longueur d'onde λ = 25,64 nm peut-il être absorbé par un électron se trouvant initialement sur le niveau n = 2 de l'hydrogénoïde Be^{3+} ? Si oui, dans quel état se trouve alors l'ion Be^{3+} ?

Réponse : Oui et $n_f = 6$

Corrigé de la série de TD N°2, Structure de la Matière

Exercice 1

1. Ces radiations appartiennent au domaine du visible puisqu'elles sont comprises entre 400 et 800 nm.
2. Ce spectre est constitué de cinq raies de longueurs d'onde différentes ; c'est un spectre discontinu.
3. Les raies du spectre d'absorption se produisent au même endroit que les raies d'émission. Les raies absorbées par l'atome de mercure sont les mêmes que celles émises par cet atome.

Exercice 2

Soumis à une radiation, l'atome d'hydrogène émet des rayonnements, il présente un spectre de raies.

1. Les trois séries : (il suffit de citer une des trois séries dans l'infrarouge)
   - Série de Lyman dans l'ultraviolet
   - Série de Balmer dans le visible,
   - Série de Paschen, série de Bracket, série de Pfund dans l'infrarouge.
2. Après émission de raies dans le domaine du visible ; l'électron se trouve sur $\boldsymbol{n_f} = \mathbf{2}$
3. Les longueurs d'ondes calculées selon la relation de Rydberg-Balmer :

$$\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{R_H} \cdot \mathbf{Z^2}\left[\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{n_1^2}} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{n_2^2}}\right] \text{ avec } \mathbf{n_2} > \mathbf{n_1}$$

Série de Lyman $(n_1 = 1)$

La première raie : Transition $n_2 = 2 \longrightarrow n_1 = 1$

$$\frac{1}{\lambda_1} = R_H \cdot Z^2\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right] = 8{,}2275 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{\lambda_1} = \frac{1}{8{,}2275 \cdot 10^6} = 1{,}215 \cdot 10^{-7}\text{m} = 121{,}5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{121,543 \text{ nm}}$$

La raie limite : Transition $n_2 = \infty \longrightarrow n_1 = 1$

$$\frac{1}{\lambda_{\ell im}} = R_H \cdot Z^2\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{\lambda_{\ell im}} = \frac{1}{1{,}097 \cdot 10^7} = 9{,}1157 \cdot 10^{-8}\text{m} = 91{,}15 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{91,157 \text{ nm}}$$

Série de Balmer $(n_1 = 2)$

La première raie : Transition $n_2 = 3 \longrightarrow n_1 = 2$

$$\frac{1}{\lambda_1} = R_H \cdot Z^2\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right] = 1{,}523611 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{\lambda_1} = \frac{1}{1{,}523611 \cdot 10^6} = 6{,}56335 \cdot 10^{-7}\text{m} = 656{,}335 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{656,335 \text{ nm}}$$

La raie limite : Transition $n_2 = \infty \longrightarrow n_1 = 1$

$$\frac{1}{\lambda_{\ell im}} = R_H \cdot Z^2\left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty}\right] = 2{,}7425 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{\lambda_{\ell im}} = \frac{1}{2{,}7425 \cdot 10^6} = 3{,}64631 \cdot 10^{-7}\text{m} = 364{,}631 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{364,631 \text{ nm}}$$

Série de Paschen ($n_1 = 3$)

La première raie : Transition $n_2 = 4 \longrightarrow n_1 = 3$

$$\frac{1}{\lambda_1} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}\right] = 5{,}33263 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{\lambda_1} = \frac{1}{5{,}33263 \cdot 10^6} = 1{,}875247 \cdot 10^{-6}\text{m} = 1875{,}247 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{1875,247 \text{ nm}}$$

La raie limite : Transition $n_2 = \infty \longrightarrow n_1 = 3$

$$\frac{1}{\lambda_{\ell im}} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{3^2} - \frac{1}{\infty}\right] = 1{,}21889 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{\lambda_{\ell im}} = \frac{1}{1{,}21889 \cdot 10^6} = 8{,}20419 \cdot 10^{-7}\text{m} = 820{,}419 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{820,419 \text{ nm}}$$

Série de Brackett ($n_1 = 4$)

La première raie : Transition $n_2 = 5 \longrightarrow n_1 = 4$

$$\frac{1}{\lambda_1} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2}\right] = 2{,}46825 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{\lambda_1} = \frac{1}{2{,}46825 \cdot 10^6} = 4{,}051453 \cdot 10^{-6}\text{m} = 4051{,}453 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{4051,453 \text{ nm}}$$

La raie limite : Transition $n_2 = \infty \longrightarrow n_1 = 4$

$$\frac{1}{\lambda_{\ell im}} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{4^2} - \frac{1}{\infty}\right] = 6{,}85625 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{\lambda_{\ell im}} = \frac{1}{6{,}85625 \cdot 10^5} = 1{,}458523 \cdot 10^{-7}\text{m} = 1458{,}523 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{1458,523 \text{ nm}}$$

Série de Pfund ($n_1 = 5$)

La première raie : Transition $n_2 = 6 \longrightarrow n_1 = 5$

$$\frac{1}{\lambda_1} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2}\right] = 1{,}340778 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{\lambda_1} = \frac{1}{1{,}340778 \cdot 10^5} = 7{,}458356 \cdot 10^{-6}\text{m} = 7458{,}356 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{7458,356 \text{ nm}}$$

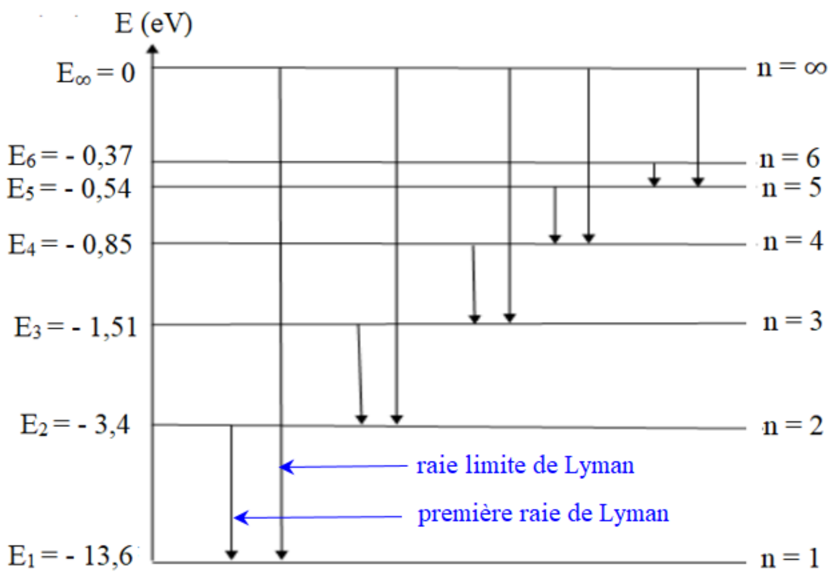
La raie limite : Transition $n_2 = \infty \longrightarrow n_1 = 5$

$$\frac{1}{\lambda_{\ell im}} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] = 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \left[\frac{1}{5^2} - \frac{1}{\infty}\right] = 4{,}388 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$$

$$\Longrightarrow \boldsymbol{\lambda_{\ell im}} = \frac{1}{4{,}388 \cdot 10^5} = 2{,}278942 \cdot 10^{-6}\text{m} = 2278{,}942 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{2278,942 \text{ nm}}$$

Série	n_1	Transition	λ_1 (nm)	Transition	$\lambda_{\ell im}$ (nm)
Lyman	1	$2 \rightarrow 1$	121,543	$\infty \rightarrow 1$	91,157
Balmer	2	$3 \rightarrow 2$	656,335	$\infty \rightarrow 2$	364,631
Paschen	3	$4 \rightarrow 3$	1875,247	$\infty \rightarrow 3$	820,419
Brackett	4	$5 \rightarrow 4$	4051,453	$\infty \rightarrow 4$	1458,523
Pfund	5	$6 \rightarrow 5$	7458,356	$\infty \rightarrow 5$	2278,942

4. Représentation des raies dans le diagramme énergétique : spectre d'émission



5. L'énergie d'ionisation : $E_{ion} > 0$

$E_n = -13{,}6 \cdot \frac{Z^2}{n^2} (eV)$

$\mathbf{E_{ion}} = \Delta E = E_{finale} - E_{initiale} = E_{\infty} - E_1 = -\mathbf{E_1}$

Energie d'ionisation en eV :

$\mathbf{E_{ion}} = -E_1 = -13{,}6 \cdot \frac{1^2}{1^2} \Rightarrow \mathbf{E_{ion} = 13,6\ eV}$

Energie d'ionisation en Joule :

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

$\mathbf{E_{ion}} = 13{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = \mathbf{21,76 \cdot 10^{-19}\ J}$

Exercice 3

Un hydrogénoïde $_Z X^{y+}$ absorbe dans son état stable un rayonnement. Sachant que son énergie d'ionisation $E_{ion} = 54{,}4\ eV$

1. Pour identifier l'Hydrogenoïde → calcul le numéro atomique **Z**

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

$\mathbf{E_{ion}} = \Delta E = E_{finale} - E_{initiale} = E_{\infty} - E_1 = -\mathbf{E_1}$

$\mathbf{E_{ion}} = -E_1 = 13{,}6 \cdot \frac{Z^2}{n^2} = 54{,}4 \Rightarrow 13{,}6\, Z^2 = 54{,}4 \Rightarrow Z = \sqrt{\frac{54{,}4}{13{,}6}} \rightarrow \mathbf{Z = 2}$

L'hydrogenoïde est : $_2\mathbf{He^+}$

2. Calcul de la longueur d'onde (en nm) de la radiation qui permettrait d'arracher cet électron.

$$\mathbf{E_{ion}} = \Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \longrightarrow \boldsymbol{\lambda} = \frac{\mathbf{hc}}{\mathbf{E_{ion}}}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{54{,}4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 2{,}282 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{m} = \mathbf{22{,}821\ nm}$$

Ou bien : arracher l'électron (ionisation) de $\mathbf{n_1 = 1} \longrightarrow \mathbf{n_2} = \infty$

On utilise la relation de Balmer-Rydberg :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \longrightarrow \frac{1}{\lambda} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty}\right] = R_H \cdot Z^2 \Longrightarrow \boldsymbol{\lambda} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{R_H \cdot Z^2}}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{1}{1{,}097 \cdot 10^{7} \cdot 2^{2}} = 2{,}2789 \cdot 10^{-8}\mathrm{m} = 22{,}789 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{m} = \mathbf{22{,}789\ nm}$$

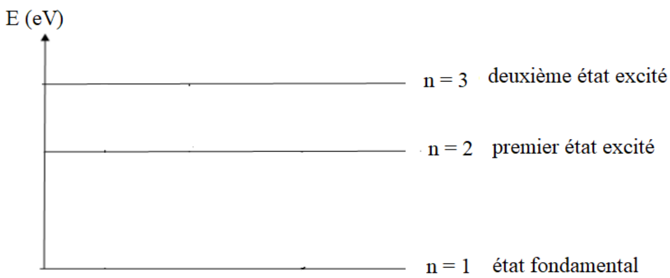
3. Calcul de l'énergie totale de cet électron s'il est sur son second état d'excitation :

Second état d'excitation $\longrightarrow$ **n = 3**

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

$$\mathbf{E_3} = -13{,}6 \cdot \frac{2^2}{3^2} = \mathbf{-\ 6{,}04\ eV}$$

$$\mathbf{E_3} = -\ 6{,}04 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = \mathbf{-\ 9{,}67 \cdot 10^{-19}\ J}$$



4. Calcul le rayon de l'orbite et la vitesse de l'électron quand il se trouve au niveau n = 3

$$r_n = a_0 \cdot \frac{n^2}{Z} \qquad \text{avec} \qquad a_0 = 0{,}53\ \text{Å} = 0{,}53 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{m}$$

$$\mathbf{r_3} = 0{,}53 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{3^2}{2} = \mathbf{2{,}385 \cdot 10^{-10}\ m = 2{,}385}\ \text{Å}$$

$$V_n = V_0 \cdot \frac{Z}{n} \qquad \text{avec} \qquad v_0 = 2{,}18 \cdot 10^{6}\ \mathrm{m/s}$$

$$\mathbf{V_3} = 2{,}18 \cdot 10^{6} \cdot \frac{2}{3} = \mathbf{1{,}453 \cdot 10^{6}\ m/s}$$

5. On montre que l'absorption d'un photon de nombre d'onde $\bar{\nu} = 1{,}56 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m^{-1}}$ par l'hydrogénoïde Be^{3+} **(Z = 4)** à l'état fondamental **(n_1 = 1)** est possible. Pour cela, l'électron doit atteindre un niveau énergétique bien déterminé donc la valeur de n doit être une valeur entière (ou presque).

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \longrightarrow \bar{\nu} = R_H \cdot Z^2 \left[\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right] \longrightarrow \frac{1}{n_2^2} = 1 - \frac{\bar{\nu}}{R_H Z^2} \longrightarrow \mathbf{n_2} = \sqrt{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1} - \frac{\bar{\boldsymbol{\nu}}}{\mathbf{R_H Z^2}}}}$$

$$n_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{1{,}56 \cdot 10^{8}}{1{,}097 \cdot 10^{7} 4^{2}}}} \Longrightarrow \mathbf{n_2 = 3}$$

On trouve $n_2 = 3$, nombre entier, Le photon est donc absorbé et l'électron passe de n = 1 vers n = 3.

Exercice 4

1. La longueur d'onde associée : $\boldsymbol{\lambda = \frac{h}{mv}}$

➢ Un électron dont l'énergie cinétique $E_c = 54\ eV$

$$E_c = \frac{1}{2}\, m_e\, v_e^2 \longrightarrow v_e = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} \longrightarrow v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 54 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{9{,}109 \cdot 10^{-31}}} \Longrightarrow v_e = 4{,}355 \cdot 10^{6}\ m/s$$

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{h}{m_e v_e}} \longrightarrow \lambda = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{9{,}109 \cdot 10^{-31} \cdot 4{,}355 \cdot 10^{6}} = 1{,}67 \cdot 10^{-10}\ m \Longrightarrow \boldsymbol{\lambda = 1{,}67}\ \text{Å}$$

✓ La longueur d'onde associée à l'électron (particule microscopique) est de l'ordre des dimensions des particules atomiques.

➢ Un proton accéléré sous une différence de potentiel $U = 10^6$ V

$$E_c = \frac{1}{2}\, m_p\, v_p^2 = e \cdot U \longrightarrow v_p = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_p}} \longrightarrow v_p = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{6}}{1{,}672 \cdot 10^{-27}}} \Longrightarrow v_p = 1{,}383 \cdot 10^{7} m/s$$

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{h}{m_p v_p}} \longrightarrow \lambda = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{1{,}672 \cdot 10^{-27} \cdot 1{,}383 \cdot 10^{7}} = 2{,}86 \cdot 10^{-14} m \Longrightarrow \boldsymbol{\lambda = 2{,}86 \cdot 10^{-4}}\ \text{Å}$$

✓ La longueur d'onde associée au proton (particule microscopique) est de l'ordre des dimensions des particules nucléaire.

➢ Un avion de chasse de 15 tonnes volant à 2800 km/h

$$m_{avion} = 15\ \text{tonnes} = 15 \cdot 10^{3} kg$$

$$v_{avion} = \frac{2800 \cdot 10^{3}(m)}{3600(s)} = 777{,}78\ m/s$$

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{h}{m_{avion} v_{avion}}} = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{15 \cdot 10^{3} \cdot 777{,}78} \longrightarrow \boldsymbol{\lambda = 5{,}67 \cdot 10^{-41} m}$$

✓ La valeur de la longueur d'onde $\lambda = 5{,}67 \cdot 10^{-41} m$ est négligeable par rapport aux dimensions de l'avion,

2. Les valeurs calculées confirment bien que le postulat de De Broglie ne s'applique qu'à l'échelle atomique et subatomique.

3. Application de principe d'incertitude de Heisenberg et calcul l'incertitude sur la vitesse Δv_x de :

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

$$m \cdot \Delta v_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

Δp_x: *l'incertitude sur la quantité de mouvement*
Δv_x: *l'incertitude sur la vitesse*
Δx: *l'incertitude sur la position*

➢ Un électron se déplaçant en ligne droite ($\Delta x = 1Å = 10^{-10}$ m)

$$m \cdot \Delta v_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi} \longrightarrow \Delta v_x \geq \frac{h}{2\pi \cdot m \cdot \Delta x}$$

$$\Delta v_x \geq \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 9{,}109 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-10}} \Longrightarrow \Delta v_x \geq 1{,}16 \cdot 10^{6} \mathrm{m/s}$$

➢ Une bille de masse 1g se déplaçant sur une droite dont la position est connue à 1 mm près $\Longrightarrow \Delta x = 1mm$

$$\Delta v_x \geq \frac{h}{2\pi \cdot m \cdot \Delta x} \longrightarrow \Delta v_x \geq \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}} \Longrightarrow \Delta v_x \geq 1{,}054 \cdot 10^{-28}\ \mathrm{m/s}$$

4. Le principe d'incertitude de Heisenberg n'a pas de conséquence à l'échelle de la bille (échelle macroscopique) car, dans ce cas, l'incertitude sur la vitesse est insignifiante. Par contre, l'incertitude sur la vitesse est très grande pour l'électron et on ne peut pas connaitre la position et la vitesse (ou quantité de mouvement) simultanément et de façon précise.