

Physique : DS1

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la **qualité de la rédaction**, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats littéraux, et à souligner les applications numériques.

Partie A – Chasse au plomb

Ce sujet s'intéresse à des aspects de sécurité d'un usage particulier, très répandu dans le monde, du métal plomb Pb. La **partie I** se propose d'étudier les trajectoires décrites par la gerbe de plomb d'une cartouche de chasse. La **partie II** s'intéresse à un procédé chimique de fabrication du plomb à partir du minerai. Le caractère toxique sera évoqué dans la **partie III**. La **partie IV** étudie l'élaboration physique de la « grenaille » de plomb.

Les données utiles sont placées en en-tête de chaque partie. À l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont aussi indépendantes les unes des autres. Le candidat peut utiliser une formule donnée dans l'énoncé, sans l'avoir démontrée, pour continuer à répondre aux questions posées dans la suite du sujet.

Partie I – Trajectoires des plombs d'une cartouche

Données

- On suppose l'accélération de la pesanteur égale à $\vec{g} = -g\vec{k}$ avec $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- Le référentiel terrestre est supposé galiléen.
- Masse volumique du plomb solide : $\rho = 11\,350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Masse volumique de l'air : $\rho_a = 1,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Un fusil de chasse (arme à feu) ou de ball-trap permet d'envoyer à distance des projectiles au moyen de gaz produits par la combustion rapide et confinée d'un composé chimique. La déflagration va éjecter de la bouche du fusil les sphères de plomb qui étaient dans la cartouche avec une vitesse qui, en moyenne, vaut $v_0 = 380 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, valeur à utiliser dans toutes les applications numériques ultérieures.

Document 1

Les données suivantes sont fournies par un fabricant de cartouches de fusil de chasse (contenant de la grenaille de plomb ou de fer doux, dont les projectiles sont appelés « plombs » quelle que soit leur nature). La photographie ci-dessous est celle d'une cartouche en partie dénudée.



La vitesse de vol des billes de plomb dépend en premier lieu de leur taille. Avec une même vitesse de départ on obtient des différences considérables puisque, en raison de leur masse moins importante, les plombs de petit diamètre perdent plus de vitesse pour une même distance parcourue, face à la résistance de l'air à laquelle ils sont confrontés. La distance de sécurité de la grenaille de plomb, c'est-à-dire la distance au-delà de laquelle il n'y a plus danger pour les tiers, peut être déterminée à partir de la règle grossière suivante : diamètre des plombs $\times 100 =$ zone dangereuse en m. Exemple : pour des plombs de 3 mm : $3 \times 100 = 300 \text{ m}$.

Voilà la distance maximale possible avec l'angle de tir le plus favorable, à ne pas confondre avec la portée utile, qui est beaucoup plus faible. Dans le cas de la grenaille de fer doux, cette distance de sécurité est nettement plus faible en raison de la moindre densité des billes. Par contre, en cas d'agglutination, les billes agglutinées constituent des projectiles d'un poids supérieur qui peuvent être dangereux à des distances beaucoup plus grandes. Selon la taille des grains, la portée utile avec de la grenaille de plomb est de 35 à 40 m tout au plus. Au-delà, la dispersion est trop grande de sorte qu'il n'y a plus de couverture suffisante. La puissance de pénétration et la létalité des plombs diminuent avec l'augmentation de la distance de tir et ce, d'autant plus rapidement que les plombs sont plus petits.

Nous allons vérifier ces affirmations.

Nous considérons la trajectoire d'un plomb de cartouche dont la dimension est typiquement de quelques millimètres et la masse inférieure au gramme. On néglige la poussée d'Archimède.

Équation du mouvement

Le projectile est a priori soumis à deux forces : son poids et la force de frottement fluide exercée par l'air qui, dans les cas considérés, est constituée de la traînée aérodynamique qui s'écrit

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} \rho_a S C_D v \vec{v},$$

où v est la norme du vecteur vitesse \vec{v} du projectile, ρ_a est la masse volumique de l'air, $S = \pi R^2$ est la section de l'objet exposée au fluide dans la direction de l'écoulement et C_D est un coefficient sans dimension appelé « coefficient de traînée ». Pour les vitesses typiques étudiées (vitesses supersoniques situées entre 375 et 420 m/s) et pour les formes quasi-sphériques de projectiles, C_D est de l'ordre de 0,44.

Q1. Établir l'équation différentielle du mouvement du centre de masse du plomb de masse m .

On confondra, par la suite, le plomb avec une masse ponctuelle à laquelle on appliquera la force de traînée aérodynamique.

Premier modèle : trajectoire gravitaire

On considère le cas où la vitesse initiale du projectile est suffisamment faible pour que l'on puisse négliger la force de frottement fluide de l'air.

Q2. Montrer que cela correspondrait à une vitesse initiale v_0 , obéissant à l'inégalité

$$v_0 \ll \sqrt{\frac{2mg}{\rho_a \pi R^2 C_D}}.$$

Par la suite on notera $v_\infty = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_a \pi R^2 C_D}}.$

Q3. Projeter l'équation du mouvement sur la base cartésienne (**figure 1**, page 4). On note θ l'angle de la vitesse \vec{v} avec le plan horizontal et θ_0 sa valeur à l'instant initial. On prend un repère tel que $\vec{v}_0 = v_0(\cos \theta_0 \vec{i} + \sin \theta_0 \vec{j})$ et dont l'origine O est la position de la particule à l'instant initial.

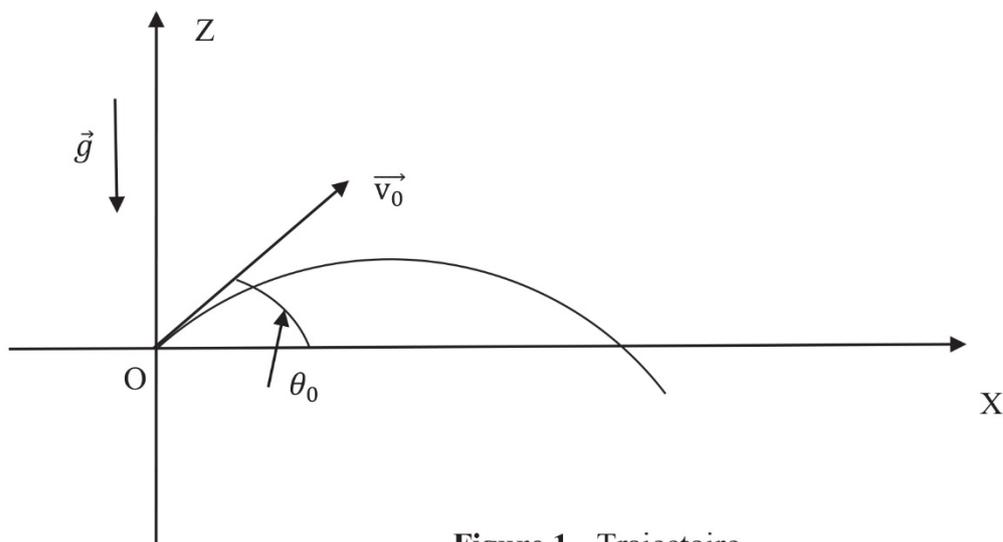


Figure 1 - Trajectoire

- Q4.** Établir les équations paramétriques de la vitesse et de la position en fonction du temps.
- Q5.** Quelle est la nature de cette trajectoire dite « gravitaire » ?
- Q6.** Montrer que la portée du tir, c'est-à-dire la distance atteinte par le projectile dans le plan horizontal de départ ($Z = 0$), vaut

$$X_M = \frac{v_0^2 \sin(2\theta_0)}{g}$$

et que la hauteur maximale atteinte par le projectile vaut

$$H_M = \frac{v_0^2 \sin^2(\theta_0)}{2g}.$$

- Q7.** Donner la valeur de l'angle θ_0 pour laquelle la portée est maximale.
- Q8.** Application numérique
La taille des plombs est identifiée par un numéro allant de 1 à 12 qui correspond à une régression arithmétique des diamètres de 0,25 mm par numéro. Une cartouche de n° 8 possède des plombs plus petits qu'une de n° 4. Le **tableau 1** ci-dessous donne les rayons de quelques types de plombs et certains résultats numériques obtenus en utilisant les formules ci-dessus pour une vitesse initiale $v_0 = 380 \text{ m.s}^{-1}$.

n° du plomb	1	5	10
Rayon (mm)	2,0	1,5	0,875
Masse m (g)	0,38	?	0,031
Portée X_M (km)	?	?	?
Hauteur H_M (km)	?	?	?
v_∞ (m.s^{-1})	33	?	22

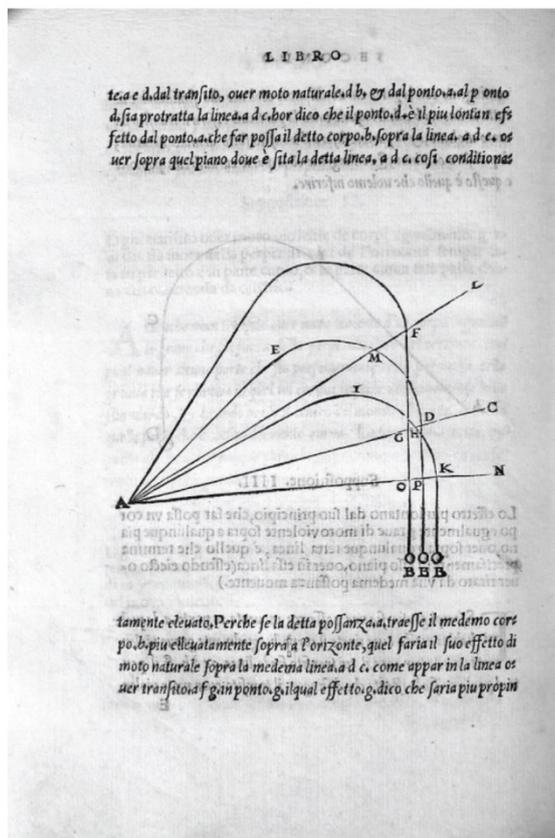
Tableau 1

Reporter le **tableau 1** sur votre copie en le complétant par des valeurs à deux chiffres significatifs.

Q9. Comparer la portée maximale, obtenue pour un angle $\theta_0 = 45^\circ$, à la portée donnée dans le **document 1** (pages 2-3) et conclure. Quel(s) autre(s) facteur(s) montre(nt) qu'il faut abandonner le modèle gravitaire ?

Deuxième modèle : trajectoire de Tartaglia

On vient de voir dans l'étude précédente que, pour les plombs de chasse, v_0 est très supérieure à v_∞ . Dans ce cas, la trajectoire diffère considérablement de la trajectoire gravitaire. On distingue 3 phases : une première phase à mouvement rectiligne, une deuxième phase à trajectoire asymétrique autour d'un sommet et une troisième phase de mouvement de chute verticale. Il s'agit d'une « trajectoire de Tartaglia », du nom du mathématicien balisticien Niccolò Tartaglia (XVI^e siècle, portrait ci-dessous), qui a décrit les trajectoires (extrait ci-dessous) d'un boulet de canon.



Phase initiale : mouvement rectiligne ascendant

Soit OX' la direction de la droite trajectoire dans cette phase initiale. On note X' l'abscisse du point M sur cette droite qui fait un angle θ_0 avec OX et \vec{v} sa vitesse (**figure 2**, page 6).

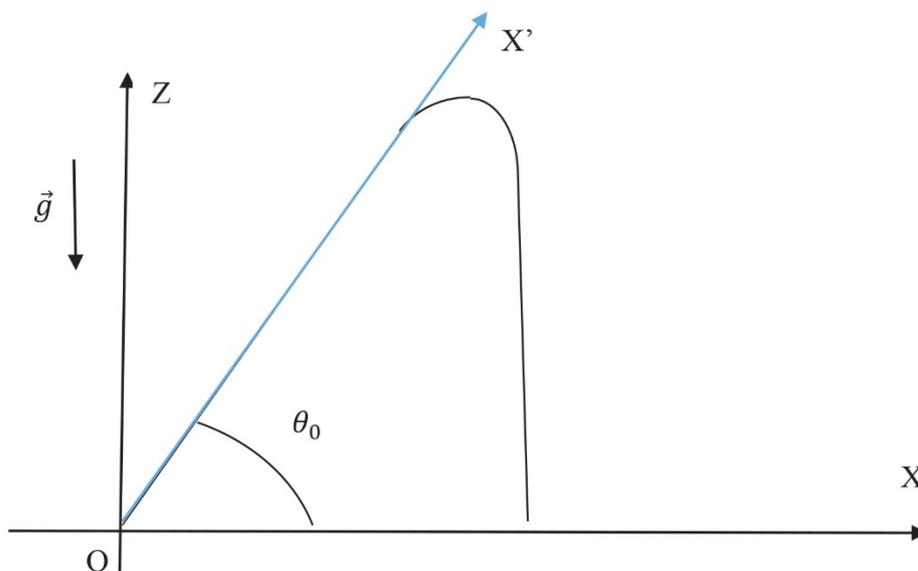


Figure 2 - Trajectoire de Tartaglia

Q10. Montrer que le poids d'un plomb est alors négligeable devant la force de traînée.

Q11. Montrer que l'équation du mouvement dans la première phase se met sous la forme :

$$\frac{d\vec{v}}{dX'} = -\frac{g}{v_\infty^2} \vec{V} = -\frac{1}{D} \vec{V} .$$

Q12. Quelle est la dimension de D ?

Q13. Établir l'expression de \vec{v} en fonction de X' .
Que représente le paramètre D ?

Q14. On note d la distance que doit parcourir le plomb pour atteindre une vitesse $10 v_\infty$, v_u la vitesse atteinte quand le plomb a parcouru 40 m et E_c l'énergie cinétique correspondante. Le **tableau 2** ci-dessous donne pour trois numéros de plomb des résultats numériques obtenus en utilisant les formules ci-dessus pour une vitesse initiale $v_0 = 380 \text{ m.s}^{-1}$.

n° du plomb	1	5	10
D (m)	110	?	50
v_0/v_∞	11	?	17
d (m)	15	?	27
v_u (m.s ⁻¹)	270	?	170
E_c (J)	13,5	?	0,45

Tableau 2

Reporter le **tableau 2** sur votre copie en le complétant par des valeurs à deux chiffres significatifs.

Q15. Comment définiriez-vous la portée utile d'un tir ?

On lit dans les journaux de chasse que le caractère mortel du tir vient en première approximation du fait que les plombs qui pénètrent dans le gibier communiquent à l'animal leur énergie cinétique créant ainsi une onde de choc fatale.

Q16. En supposant qu'il suffit de 2 plombs numéro 1 pour avoir un canard à son tableau de chasse, de combien de plombs 5 et 10 suffirait-il ?
En déduire l'ordre de grandeur de la portée utile à l'aide de l'évaluation du paramètre D précédemment défini.

Q17. Comparer aux valeurs données dans le **document 1** (pages 2-3).
Pourquoi faut-il prendre des billes plus grosses en fer doux, sachant qu'il s'agit d'un acier de masse volumique $\rho' = 7600 \text{ kg.m}^{-3}$?
Quel est le danger lié à l'agglutination de la grenaille ?

Troisième et dernière phase : mouvement rectiligne descendant

On note que cette phase est quasiment verticale.

Q18. À quoi correspond-elle ?

Q19. Montrer que la vitesse limite atteinte pendant cette dernière phase vaut :

$$\vec{v}_\infty = \sqrt{\frac{2mg}{\rho\pi R^2 C_D}} (-\vec{k}).$$

Expliquer le terme de « mur aérodynamique » utilisé pour qualifier cette dernière phase.

Deuxième phase : la phase intermédiaire

Dans cette phase, la vitesse a diminué.

Q20. Pourquoi qualifie-t-on cette phase de « phase gravitaire » ?

On peut établir par un calcul formel, à partir de l'équation du mouvement, l'expression approchée de la portée maximale du projectile pour ce type de trajectoire :

$$X_M \approx \frac{D \cos(\theta_0)}{2} \text{Ln} \left[1 + 4 \left(\frac{v_0}{v_\infty} \right)^2 \sin^2(\theta_0) \right] = H \cotan(\theta_0).$$

Q21. Évaluer numériquement les portées maximales des numéros 1, 5 et 10 de plombs, pour $\theta_0 = 16^\circ$.
Comparer aux valeurs données dans le **document 1** (pages 2-3).

Le même calcul donne également l'expression approchée de l'angle initial permettant d'optimiser la portée maximale X_M .

$$\theta_{max} \approx \arctan \left(\sqrt{\frac{2\sqrt{2}(v_0/v_\infty)^2}{[1 + 2\sqrt{2}(v_0/v_\infty)^2][\text{Ln}(1 + 2\sqrt{2}(v_0/v_\infty)^2)]}} \right).$$

Q22. La **figure 3** (page 8) donne la courbe θ_{max} , (en degrés) fonction de $\log(v_0/v_\infty)^2$. Identifier la valeur de θ_{max} pour les trois numéros de plomb considérés.

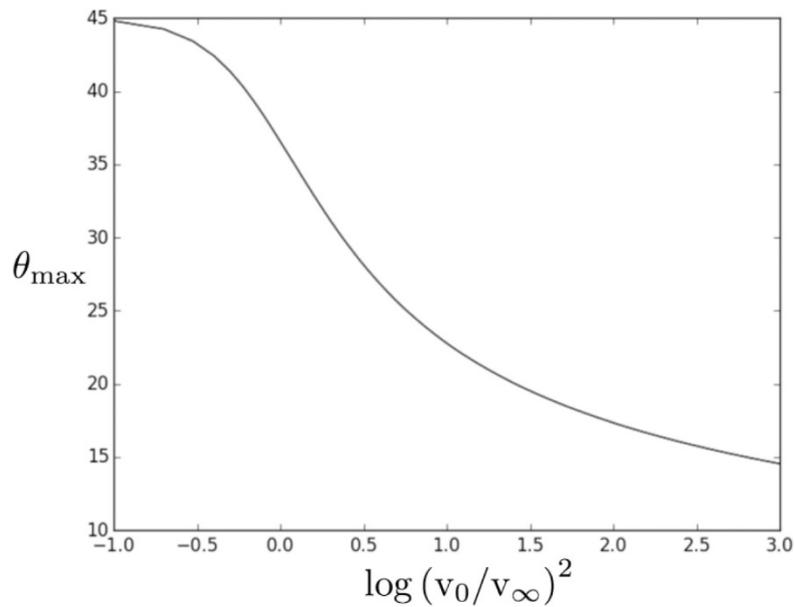


Figure 3 - Angle initial optimal

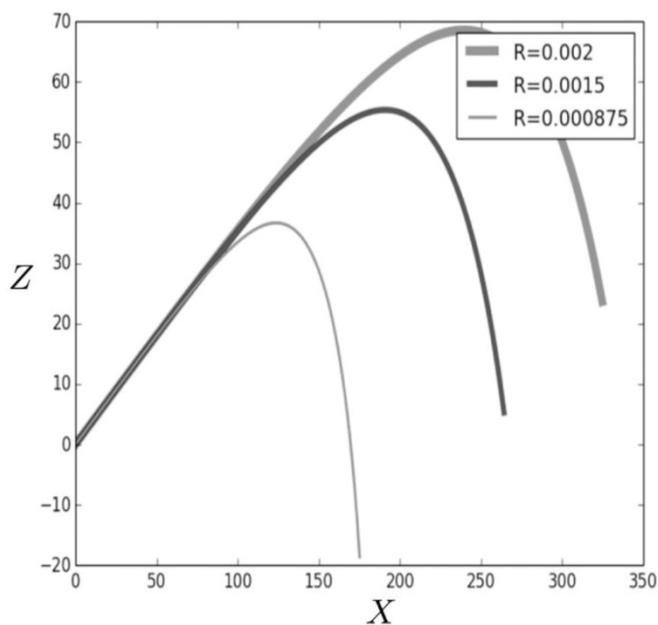


Figure 4 - Trajectoires de différents plombs

Pour calculer plus précisément la portée utile du tir de grenaille de plomb, on intègre numériquement l'équation du mouvement.

La **figure 4** donne les trajectoires des plombs n° 1, 5 et 10 de vitesse initiale $380 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pour l'angle θ_0 optimisant la portée maximale. Les valeurs des coordonnées et des rayons sont en mètres.

Q23. Évaluer les portées maximales pour chaque calibre et comparer aux données du **document 1** (pages 2-3).

Partie B – Raie HI à 21 cm

De l'atome d'hydrogène aux galaxies

L'atome d'hydrogène, dans son état fondamental, absorbe ou émet un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde $\lambda = 21$ cm. Cette transition, appelée raie HI à 21 cm, est celle du maser à hydrogène. Elle est aussi à l'origine du rayonnement émis à cette longueur d'onde par le milieu interstellaire constitutif des galaxies. Après avoir étudié l'origine physique de cette transition, nous verrons l'intérêt d'observer des galaxies dans cette fenêtre de rayonnement.

Ce sujet comprend une annexe située en fin de texte et regroupant des extraits de documents, un formulaire et des données numériques.

I La raie HI à 21 cm

Un atome d'hydrogène protoné (isotope ^1H dont le noyau est un proton) dans son état fondamental peut absorber un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde $\lambda = 21$ cm, c'est ce que l'on appelle usuellement la raie HI à 21 cm. Pour interpréter exactement l'origine de cette raie, il faut mener une étude complète de l'atome d'hydrogène dans le cadre de la théorie de Dirac (mécanique quantique relativiste).

Nous pouvons cependant comprendre qualitativement l'origine de la raie HI à partir des quelques notions simples évoquées dans ce qui suit.

I.A – Étude classique de l'atome d'hydrogène

L'étude qui suit sera menée dans le référentiel \mathcal{R} centré sur le proton, ce référentiel sera considéré comme galiléen. On désignera par r la distance entre le proton et l'électron et le moment cinétique de l'électron par rapport à l'origine dans le référentiel \mathcal{R} sera noté \vec{L} .

- Q 1.** Rappeler l'expression de la force électrostatique \vec{F} s'exerçant sur l'électron.
Q 2. En déduire l'expression de l'énergie potentielle électrostatique E_P de l'électron, en choisissant le zéro de cette énergie potentielle quand $r \rightarrow \infty$.
Q 3. Montrer que le mouvement de l'électron est plan.
Q 4. Déterminer l'énergie mécanique E de l'électron et la mettre sous la forme

$$E = \frac{1}{2}m_e\dot{r}^2 + E_{P\text{eff}}(r)$$

où $E_{P\text{eff}}(r)$ est une fonction de r à expliciter en fonction des paramètres du problème et du moment cinétique orbital L de l'électron.

- Q 5.** Donner l'allure de la représentation graphique de $E_{P\text{eff}}(r)$. Analyser qualitativement le comportement du système pour différentes valeurs de l'énergie mécanique E et du moment cinétique \vec{L} .
Q 6. À quelles conditions (sur L et E) une orbite circulaire est-elle possible ? Calculer le rayon r de l'orbite circulaire et l'énergie mécanique E de l'électron décrivant une telle orbite en fonction de L , e , m_e et ϵ_0 .
Q 7. Dessiner une trajectoire de l'électron si $L = 0$.

I.B – Le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène

En 1913 Niels Bohr proposa un modèle « semi-classique » de l'atome d'hydrogène, dans ce modèle l'électron se trouve sur une orbite circulaire de rayon r et son moment cinétique orbital L est quantifié par

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

où n est un nombre entier strictement positif et h la constante de Planck.

- Q 8.** Montrer que les orbites sont quantifiées. Déterminer la valeur du rayon a_0 de la première orbite de Bohr.
Q 9. En déduire que les niveaux d'énergie sont quantifiés. Donner la valeur (en eV) de l'énergie de l'état fondamental.
Q 10. À quelle température l'énergie d'agitation thermique d'un atome d'hydrogène est-elle comparable à son énergie d'ionisation ? Commenter.
Q 11. L'atome d'hydrogène dans son état fondamental est susceptible d'absorber ou d'émettre un rayonnement de longueur d'onde proche de $\lambda = 21$ cm. Le modèle de Bohr permet-il de comprendre l'origine de cette transition ?