

SESSION 2026

**AGREGATION  
CONCOURS EXTERNE SPECIAL**

**Section : PHYSIQUE-CHIMIE  
Option : PHYSIQUE**

**COMPOSITION DE PHYSIQUE-CHIMIE**

Durée : 6 heures

*Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

**Cette épreuve comporte deux parties : une partie à dominante physique et une partie à dominante chimie. Les deux parties de l'épreuve devront être rédigées sur deux copies distinctes.**

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.  
Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.**

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

### Physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAD	1500A	101A	0590

### Chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAD	1500A	101B	0591

## CONSIGNES A L'ATTENTION DU CANDIDAT

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

Le candidat n'hésitera pas à formuler les commentaires qui lui semblent pertinents, même lorsque l'énoncé ne le demande pas explicitement. Le barème tient compte de ces initiatives, ainsi que des qualités de rédaction de la copie.



## Partie à dominante physique

### Mesures avec des micro-oscillateurs mécaniques

On assiste depuis une trentaine d'années à un formidable essor de la **micromécanique**, motivé notamment par les besoins en capteurs des nouvelles technologies (par exemple, les accéléromètres présents dans les téléphones portables ou dans les voitures pour l'assistance à la conduite) et facilité par les progrès récents en microfabrication. Le sujet porte sur des mesures physiques réalisées avec de tels micro-oscillateurs.

La première partie étudie la réponse mécanique d'un oscillateur harmonique. La deuxième partie montre comment les collisions avec les molécules du milieu qui entoure l'oscillateur sont à l'origine d'un mouvement d'agitation thermique.

**Ces deux premières parties sont largement indépendantes l'une de l'autre.**

La troisième partie porte sur une mesure de force réalisée avec un tel oscillateur : le principe de la mesure est présenté, suivi du dispositif interférométrique de détection du mouvement de l'oscillateur. L'étude de résultats expérimentaux et d'un extrait de la publication scientifique associée concluent cette partie. Enfin, la quatrième partie présente deux expériences réalisées avec un nanotube de carbone, utilisé comme une corde vibrante.

**Ces deux dernières parties sont pour l'essentiel indépendantes des précédentes, et indépendantes entre elles.**

On donne les valeurs approximatives des grandeurs suivantes :

grandeur	symbole	valeur	unité
Constante de Boltzmann	$k_B$	$1,38 \times 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
Unité de masse atomique	$m_u$	$1,66 \times 10^{-27}$	kg

Dans tout le problème, on travaillera uniquement à une dimension, le long de l'axe ( $Ox$ ) repéré par un vecteur unitaire  $\vec{e}_x$ .

Pour les systèmes {masse - ressort}, on considèrera la masse du ressort comme nulle.

La gravité ne joue aucun rôle dans tout le problème.

Si  $x(t)$  est une fonction dépendante du temps, on notera  $\dot{x}(t)$  et  $\ddot{x}(t)$  ses dérivées première et seconde par rapport au temps.

La notation  $\langle A \rangle$  désigne la moyenne temporelle de la grandeur  $A(t)$ .

# I Généralités sur les oscillateurs mécaniques

## I-A Réponse mécanique d'un oscillateur

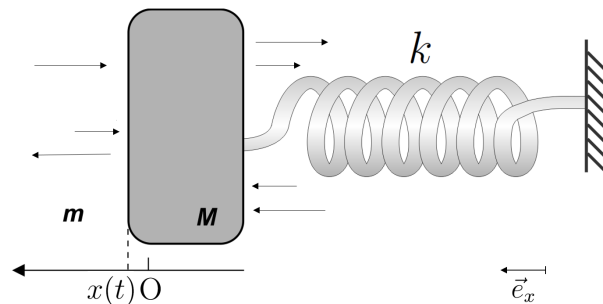


FIGURE 1 – **Géométrie de l'oscillateur.** La masse  $M$  est connectée à un ressort de raideur  $k$ . Elle subit des collisions élastiques de la part de particules microscopiques de masse  $m$ . Les flèches représentent les vitesses d'un échantillon de ces particules (on ne considère que les collisions suivant l'axe  $(Ox)$ ).

On s'intéresse à l'oscillateur harmonique constitué par une masse  $M$  et un ressort de raideur  $k$  et de masse négligeable, présenté sur la figure 1. On note  $x(t)$  l'élongation du ressort par rapport à sa position d'équilibre en l'absence de force appliquée.  $x(t)$  représente donc aussi le déplacement de l'extrémité gauche du système par rapport à sa position à l'équilibre (point  $O$ ).

1. Donner sans démonstration la pulsation de résonance  $\Omega_0$ . On notera  $f_0$  la fréquence associée.

On suppose maintenant que l'oscillateur est plongé dans un ensemble de particules microscopiques, supposées toutes identiques, de masse  $m \ll M$ , et caractérisées par une distribution des vitesses isotrope à une dimension ( $x$ ). L'amortissement de l'oscillateur dû aux collisions avec ces particules est modélisé par une force opposée à la vitesse de l'oscillateur, qu'on écrira sous la forme  $\vec{f}(\dot{x}) = -\frac{M\Omega_0}{Q}\dot{x}\vec{e}_x$ .

$Q$  est appelé *facteur de qualité mécanique* de l'oscillateur.

2. Justifier que  $Q$  est un coefficient sans dimension. On supposera  $Q \gg 1$  dans la suite.
3. Justifier brièvement l'origine de la force de frottement.
4. L'oscillateur est maintenant soumis à une force extérieure variable dans le temps :

$$\vec{F}_{\text{ext}}(t) = F_{\text{ext}}(t)\vec{e}_x. \quad (1)$$

Écrire l'équation de son mouvement sous l'effet de cette force.

5. On suppose la force  $\vec{F}_{\text{ext}}$  sinusoïdale à la pulsation  $\Omega$ , caractérisée par une amplitude complexe  $\underline{F}_\Omega$  :  $\underline{F}_{\text{ext}}(t) = \underline{F}_\Omega e^{-i\Omega t}$ . Montrer que l'amplitude complexe de l'élongation,  $\underline{x}(\Omega)$ , a pour expression en régime forcé :

$$\underline{x}(\Omega) = \underline{\chi}(\Omega)\underline{F}_\Omega, \quad (2)$$

où  $\underline{\chi}(\Omega)$  est la *susceptibilité mécanique*, dont on donnera l'expression en fonction de  $M$ ,  $\Omega_0$ ,  $Q$  et  $\Omega$ .

6. Tracer l'allure de la dépendance de  $|\underline{\chi}(\Omega)|^2$  et des variations de phase de  $\underline{\chi}(\Omega)$  avec la pulsation  $\Omega$ .
7. Définir les principales plages de fonctionnement (basse fréquence, résonance, haute fréquence) et leur principales caractéristiques.  
En particulier, montrer qu'à basse fréquence  $|\underline{\chi}| \simeq \frac{1}{M\Omega_0^2}$  et qu'à la fréquence de résonance  $|\underline{\chi}| = \frac{Q}{M\Omega_0^2}$ .

## I-B Systèmes continus

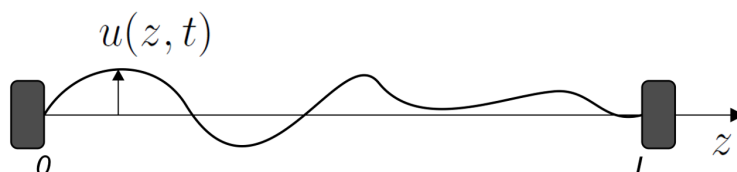


FIGURE 2 – Définition de la déformation transverse  $u(z, t)$  pour une corde vibrante.

De nombreux oscillateurs utilisés en physique fondamentale sont des systèmes continus. C'est le cas par exemple du système présenté sur la figure 2 : une corde de masse linéique  $\mu$  et de longueur  $L$ , avec un champ de déformation transverse  $u(z, t)$ . La corde est tendue à ses deux extrémités fixes avec une tension  $\mathcal{T}$ .

8. En quelles unités s'expriment  $\mathcal{T}$  et  $\mu$  ?
9. Écrire sans démonstration l'équation qui régit la propagation des ondes transverses le long de la corde en fonction de  $\mathcal{T}$  et  $\mu$ . Quelle est la célérité de ces ondes ?
10. Donner sans démonstration les fréquences de résonance de la corde. Tracer les profils des trois premiers modes propres de vibration associés.
11. Quel est l'analogie électrique de l'oscillateur décrit à la sous-section précédente ? De la corde que l'on vient de décrire ?

## II Bruit thermique d'un oscillateur mécanique

On étudie dans cette partie comment les particules microscopiques dans lesquelles l'oscillateur est plongé (cf. I-A) sont aussi responsables d'un mouvement d'agitation de cet oscillateur.

On rappelle qu'on se place à une seule dimension.

### II-A Collisions entre des particules microscopiques et une masse macroscopique

On néglige pour l'instant la force de rappel, si bien qu'on traite le problème d'une masse  $M$  en contact avec un grand nombre de particules de masse  $m$ , caractérisées par une distribution de vitesses isotrope. On considère qu'elles ont chacune la même énergie cinétique moyenne  $\langle e_c \rangle$ . On va montrer ici que l'énergie cinétique moyenne de la masse  $M$  va converger vers  $\langle e_c \rangle$ .

On admet que, si on néglige sa structure interne, la masse  $M$  peut être traitée comme une particule ponctuelle. Les collisions avec les particules de masse  $m$ , elles aussi ponctuelles, sont supposées élastiques et leur durée infiniment courte.

12. Expliquer brièvement pourquoi, même pour un oscillateur au repos, les collisions avec l'ensemble des particules microscopiques le mettent en mouvement. Comment appelle-t-on ce mouvement ? De quelle grandeur dépend-il ?

On s'intéresse d'abord à la collision de la masse  $M$  avec une seule particule. On note  $v$  la composante algébrique de la vitesse de la particule microscopique de masse  $m$ , juste avant la collision, et  $v'$  celle juste après la collision. On note  $V$  la composante algébrique de la vitesse de la masse macroscopique  $M$ , juste avant la collision, et  $V'$  celle juste après la collision.

13. Faire un schéma de la collision et écrire, en les justifiant, deux équations reliant ces grandeurs.
14. Exprimer la différence  $v' - V'$  et interpréter physiquement le résultat.
15. Exprimez  $V'$ .
16. Montrer que la variation  $\Delta E_c$  d'énergie cinétique de la masse  $M$  lors de la collision s'écrit :

$$\Delta E_c = \frac{4mM}{(m+M)^2} \left[ \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}(M-m)vV \right]. \quad (3)$$

17. Vérifier la vraisemblance de cette formule sur quelques cas particuliers simples.
18. Justifier pourquoi, sur un ensemble de collisions successives, on pourra considérer dans la suite que  $\langle vV \rangle$ , la valeur moyenne du produit  $vV$ , a une valeur nulle.
19. Établir alors une relation de récurrence entre les énergies cinétiques moyennes successives de la masse  $M$  que l'on suit au cours du temps. On notera  $\langle E_{c,n} \rangle$  (pour  $n \geq 0$ ) cette énergie moyenne avant la  $(n+1)^{\text{ième}}$  collision avec une particule de masse  $m$ .
20. Montrer que la suite  $\langle E_{c,n} \rangle$  vérifie :

$$\langle E_{c,n} \rangle - \langle e_c \rangle = (\langle E_{c,0} \rangle - \langle e_c \rangle) r^n, \quad (4)$$

où la raison  $r$  est donnée par :

$$r = \left( \frac{m-M}{m+M} \right)^2. \quad (5)$$

21. Vers quelle limite  $\langle E_{c,n} \rangle$  tend-elle pour  $n \gg 1$  ? Quel résultat bien connu retrouve-t-on ?
22. Montrer que, dans le cas où  $m \ll M$ , une estimation du nombre de collisions nécessaires pour atteindre l'équilibre est donnée par  $N \sim \frac{M}{4m}$  et commenter ce résultat.
23. La prise en compte des collisions entre les particules de masse  $m$  modifierait-elle le raisonnement précédent ?

## II-B Mouvement de l'oscillateur sous l'effet des collisions

On prend maintenant en compte la force de rappel du ressort (cf. figure 1) dans le mouvement de l'oscillateur.

24. Justifier que l'on peut analyser les collisions entre les particules microscopiques et la masse  $M$  de façon similaire à ce qui a été fait en l'absence de force de rappel (cf. II-A).
25. On suppose que le temps moyen  $\tau$  entre deux collisions est beaucoup plus long que la période des oscillations. En déduire que l'énergie cinétique moyenne  $\langle E_c \rangle$  et l'énergie potentielle moyenne  $\langle E_p \rangle$  de l'oscillateur tendent vers une limite commune. Quel résultat retrouve-t-on ?
26. Exprimer cette limite en fonction de la température  $T$  du milieu.

La figure 3 présente l'évolution temporelle de  $x(t)$  lors du mouvement de l'oscillateur, dans les cas  $m \simeq M$  et  $m \ll M$ .

27. Attribuer chacune des sous-figures (a) et (b) au cas correspondant et préciser les échelles temporelles caractéristiques  $\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$  qui y sont représentées.

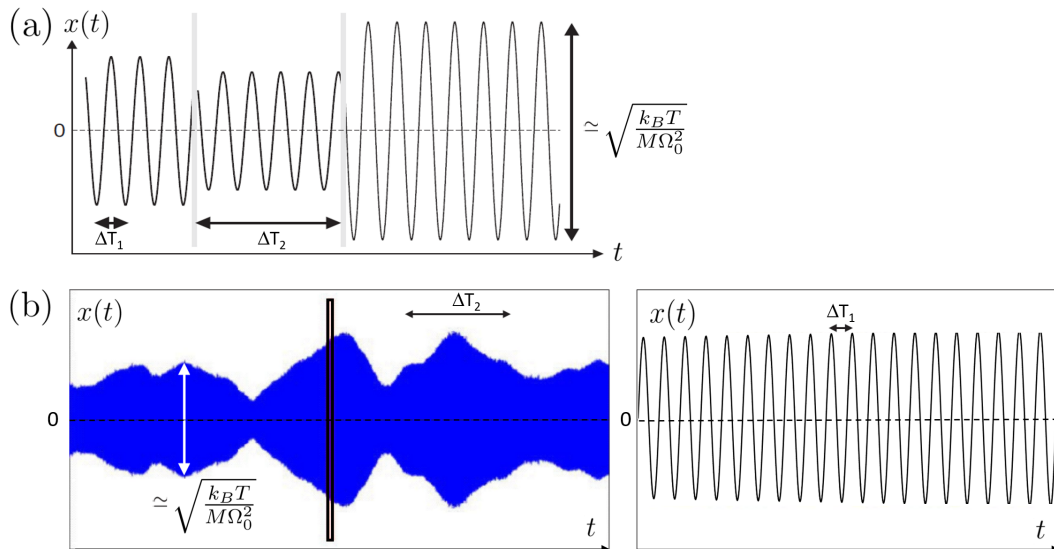


FIGURE 3 – Évolution temporelle de  $x(t)$  dans chacun des deux cas considérés. Pour la sous-figure (b), la courbe de droite est un agrandissement de la fenêtre temporelle indiquée sur la courbe de gauche par un fin rectangle.

### III Mesure de force avec un oscillateur mécanique

On s'intéresse dans cette partie à un montage permettant de mesurer une force (par exemple, l'interaction entre une pointe et une surface). On admettra qu'on peut ramener toute situation de mesure de force au cas d'un oscillateur mécanique (caractérisé par  $M$ ,  $\Omega_0$  et  $Q$ ) dont la position d'équilibre est située à une distance  $d$  d'un plan (qui représente, par exemple, la surface qui interagit avec la masse  $M$ ) et qui subit une force  $\vec{F}_0$  dépendant de la distance  $d$ .

#### III-A Principe de la mesure de force

On s'intéresse à un dispositif visant à mesurer une force statique attractive entre deux plaques métalliques carrées de 1,2 mm de côté chacune. Le montage est présenté sur la figure 4.

La plaque de droite (de masse  $M$ ) est mobile et reliée à un ressort de raideur  $k$ . La distance totale entre les deux plaques est  $d - x(t)$ , où  $x(t)$  représente l'écart à la position d'équilibre de la plaque. On a  $|x(t)| \ll d$ . La distance  $d$ , réglable en déplaçant la plaque de gauche, est de l'ordre du micromètre. On suppose que le module  $F_0$  de la force est de la forme :

$$F_0(d) = \frac{\mathcal{F}_0}{d^4} \quad (6)$$

où  $\mathcal{F}_0$  est une constante.

28. Quelle est la dimension de  $\mathcal{F}_0$  ?
29. La susceptibilité mécanique à basse fréquence est  $\chi(\Omega \ll \Omega_0) \sim \frac{1}{M\Omega_0^2}$ . En déduire un ordre de grandeur du déplacement  $\Delta x$  de l'oscillateur sous l'effet d'une force d'un nanonewton. Faire l'application numérique.
30. Comparer ce déplacement à l'amplitude  $\Delta x_T$  du mouvement d'agitation thermique à la température ambiante et commenter le résultat.

On réalise une mesure indirecte de la force en considérant son effet sur la fréquence de résonance de l'oscillateur.

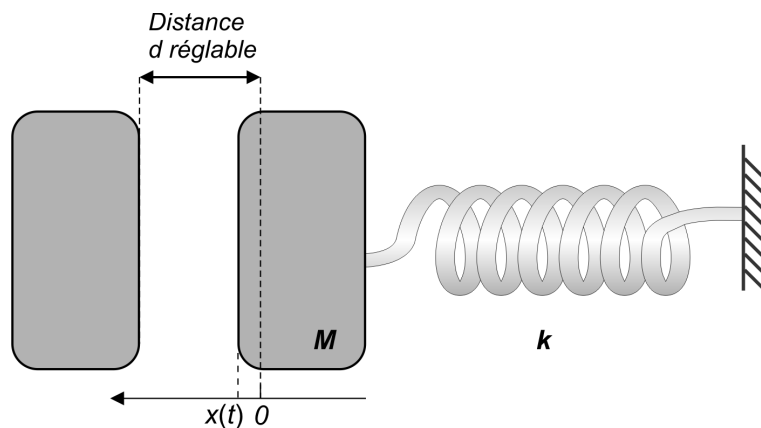


FIGURE 4 – Géométrie de l'expérience de mesure de la force. Le dispositif présenté est extrait de l'article *Measurement of the Casimir Force between Parallel Metallic Surfaces*, Physical Review Letters **88**, 041804 (2002).

31. On rappelle que  $|x(t)| \ll d$ . Si  $f_0$  représente la fréquence de résonance de l'oscillateur en l'absence de force, montrer qu'avec la force  $\vec{F}_0$ , la nouvelle fréquence de résonance mécanique  $f$  vérifie :

$$f^2 = f_0^2 - \frac{K}{d^5} \quad (7)$$

où  $K$  est une constante dont on précisera l'expression.

32. Comment serait-il judicieux de présenter les résultats des mesures de  $f$  en fonction de  $d$  pour tester la loi (7) ?

Dans la suite, on prendra  $f_0 = 138,275$  Hz et  $M = 0,6$  mg.

33. Estimer l'ordre de grandeur de la variation de fréquence  $f - f_0$  attendue pour une force  $F_0 = 1$  nN et  $d = 1 \mu\text{m}$ .

On donne les résultats expérimentaux suivants :

Distance $d$ ( $\mu\text{m}$ )	0,55	0,58	0,61	0,68	0,75	0,81	0,875	0,99
Fréquence $f$ (Hz)	122,9	127	130,4	132,6	134,9	135,8	136,6	137,1

34. Recopier et ajouter au tableau deux lignes de grandeurs définissant l'abscisse et l'ordonnée d'une courbe facile à interpréter. Tracer cette courbe et estimer la valeur de  $K$ .
35. Quelle information expérimentale supplémentaire faudrait-il pour confirmer la loi (7) ?
36. L'amortissement de l'oscillateur a-t-il une influence sur cette expérience ?
37. Commenter le texte suivant, extrait de l'article *Measurement of the Casimir Force between Parallel Metallic Surfaces* par Bressi et collaborateurs. Quels sont les deux points importants ? Expliquer en quoi ils limitent potentiellement l'intérêt de l'expérience.

*The major problems, common to previous experimental efforts, are attributable to the difficulty to achieve and control the ideal conditions of parallel and neutral surfaces. The two surfaces must be kept parallel even at the smallest gaps investigated. Also, due to the presence of different metals in the electrical circuit connecting the two surfaces, an offset voltage  $V_0$  is always present in the gap, even when the two surfaces are nominally short circuited. This voltage prevents the possibility to obtain small gap separations because the electrostatic force will cause the resonator to attach to the source. For these reasons the measuring process can be divided into three stages : parallelization of the gap between the two surfaces, on-line estimate of the offset voltage  $V_0$ , and calibration with electrostatic fields, including one canceling the effect of  $V_0$  at leading order. This last stage allows one to reach the small separations ( $\simeq 1 \mu\text{m}$ ) at which the Casimir force, thanks to its favorable scaling, is expected to dominate over the residual electrostatic force.*

### III-B Détection interférométrique du mouvement

Le mouvement de l'oscillateur est détecté ici par *interférométrie optique*. Le montage utilisé est décrit sur la figure 5. Un faisceau laser (de longueur d'onde  $\lambda$  et de puissance  $P_0$ ) est séparé par une lame semi-transparente en deux faisceaux de même puissance. Pour la lame utilisée ici, tous les coefficients de réflexion et de transmission en amplitude sont réels et valent  $1/\sqrt{2}$  en valeur absolue. Le coefficient de réflexion entre le bras de référence (en haut) et le port de sortie (à droite) est le seul coefficient négatif.

Un des faisceaux est envoyé vers un miroir fixé sur la masse mobile, sur lequel il se réfléchit parfaitement (coefficient de réflexion  $R = 1$ ). Ce faisceau se recombine alors au niveau de la lame avec le second faisceau, qui a parcouru un bras de référence contenant un miroir fixe de coefficient de réflexion là aussi maximum ( $R = 1$ ). La lumière en sortie du dispositif est détectée par une photodiode. On note  $\ell_1$  (pour  $x = 0$ ) et  $\ell_2$  les longueurs optiques de ces deux bras. On suppose que l'ensemble du dispositif est placé dans le vide.

38. À quel effet est associé le signe des coefficients de réflexion ?
39. Comment s'appelle ce dispositif ? À quelle occasion a-t-il été inventé ? En connaissez-vous une application récente ?
40. Montrer que la puissance détectée sur la photodiode se met sous la forme :

$$P = \frac{P_0}{2} (1 - C \cos \phi), \quad (8)$$

où  $\phi$  est un déphasage, que l'on exprimera en fonction de  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  et  $\lambda$ , et  $C$  le *contraste* des interférences ( $C = 1$  dans le cas idéal).

41. Comment peut-on mesurer expérimentalement la valeur de  $C$  ? Quels effets la diminuent ?

On prendra  $C = 1$  dans la suite.

42. Représenter les variations de  $P$  en fonction de  $\phi$ .

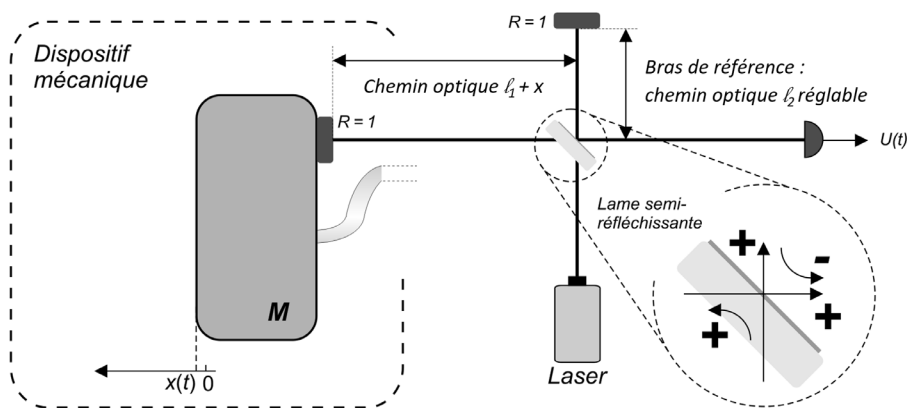


FIGURE 5 – Dispositif interférométrique de mesure du déplacement  $x(t)$ . Un miroir (parfaitement réfléchissant,  $R = 1$ ) est déposé sur la masse mobile, et réfléchit le faisceau qui parcourt le bras de longueur  $\ell_1$  (pour  $x = 0$ ). Ce faisceau interfère avec celui qui a parcouru le bras de référence de longueur  $\ell_2$ . L'intensité qui en résulte est détectée par une photodiode. Le zoom sur la lame semi-transparente précise les signes des différents coefficients de réflexion ou de transmission en amplitude.

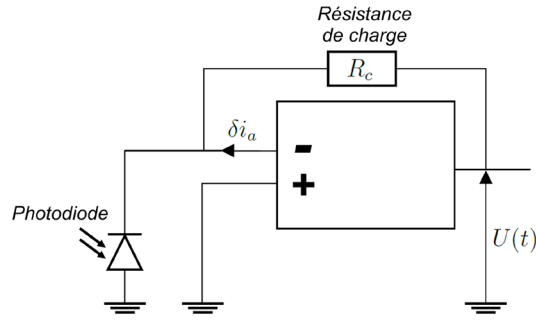


FIGURE 6 – Montage amplificateur pour lire le courant délivré par la photodiode.

On suppose que la valeur moyenne temporelle de  $x$  est nulle et que les variations  $|x(t)|$  sont toujours négligeables devant la longueur d'onde  $\lambda$ .

Le faisceau issu du dispositif est envoyé sur une photodiode qui délivre un courant proportionnel à la puissance lumineuse :  $i = \eta P$ , où  $\eta \simeq 1 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$  est l'efficacité de la photodiode. Ce courant  $i$  est envoyé sur un montage (présenté sur la figure 6) utilisant un ALI et une résistance de charge  $R_c$ . L'ALI représenté est supposé quasi idéal, les défauts étant limités au courant de l'entrée inverseuse (aussi appelé courant de fuite)  $\delta i_a(t)$ , dont on supposera qu'il est de valeur moyenne nulle mais présente des fluctuations au cours du temps.

43. Expliquer comment ce montage permet de mesurer  $x(t)$ .
44. Si on tient compte du déplacement  $x(t)$ , des possibles fluctuations  $\delta P_0$  de la puissance du laser et du courant de l'entrée inverseuse  $\delta i_a$  de l'ALI, montrer que les variations  $\delta U(t)$  de la tension mesurée en sortie de l'ALI sont de la forme :

$$\delta U(t) = R_c \left( \delta i_a(t) + \eta \frac{\delta P_0}{2} (1 - \cos \phi_0) + \eta \frac{4\pi}{\lambda} P_0 \sin \phi_0 x(t) \right). \quad (9)$$

Identifier à quoi correspond chacun des trois termes de cette addition.

On notera  $\Delta P_0$  et  $\Delta i_a$  les ordres de grandeur typiques des grandeurs  $\delta P_0$  et  $\delta i_a$ .

45. Montrer que, selon le bruit prédominant (bruit de puissance  $\delta P_0$  du laser ou bruit de courant  $\delta i_a$  de l'ALI), on est amené à régler différemment la différence de longueur entre les deux bras  $\ell_1 - \ell_2$ .
46. On définit la sensibilité du montage, notée  $\Delta x_{\min}$ , comme le plus petit déplacement que l'on peut mesurer. On se place d'abord dans le cas où la limitation vient surtout de  $\Delta P_0$ . Exprimer cette sensibilité en fonction de  $\Delta P_0$  et d'autres données du problème.
47. Même question si on est limité cette fois surtout par le courant de fuite de l'amplificateur opérationnel. On exprimera alors  $\Delta x_{\min}$  en fonction de  $\Delta i_a$  et d'autres données du problème.

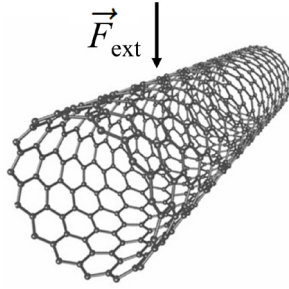


FIGURE 7 – Représentation d’un nanotube de carbone. Il peut être soumis à une force extérieure  $\vec{F}_{\text{ext}}$ .

## IV Mesures mécaniques avec un nanotube de carbone

On s’intéresse dans cette partie à des mesures réalisées avec un nanotube de carbone (voir la figure 7), qui est un feuillet d’atomes de carbone enroulé sur lui-même. Le réseau du feuillet est hexagonal, avec un atome de carbone à chaque nœud et une surface de l’hexagone d’aire  $A \simeq 5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ . Maintenu à ces extrémités, ce nanotube vibre comme une corde, et peut donc être décrit par le modèle étudié dans la partie I-B.

48. Le nanotube a une longueur  $L = 4 \mu\text{m}$  et un diamètre  $a = 2 \text{ nm}$ , calculer un ordre de grandeur de sa masse  $M$ .
49. La première résonance mécanique se situe à une fréquence  $f_0 = 4,2 \text{ MHz}$  (fréquence indépendante de celle de la partie III-A). On observe en fait deux résonances très proches. Pourquoi ?

### IV-A Mesure de force

On utilise ce nanotube pour réaliser la mesure d’une force électrique oscillant à sa première pulsation de résonance :

$$\underline{F}_{\text{ext}}(t) = \underline{F}_{\Omega_0} e^{-i\Omega_0 t}. \quad (10)$$

La figure 8 présente le bruit de position du nanotube, c’est-à-dire l’analyse en fréquence de son déplacement sous l’effet du bruit thermique et de la force électrique.

50. Commenter la forme de la courbe du seul bruit thermique, en lien avec la question 27. Estimer numériquement son facteur de qualité  $Q$ .
51. Expliquer comment le mouvement d’agitation thermique limite la sensibilité d’une telle mesure de force. Sur quels paramètres peut-on jouer pour améliorer cette sensibilité ?

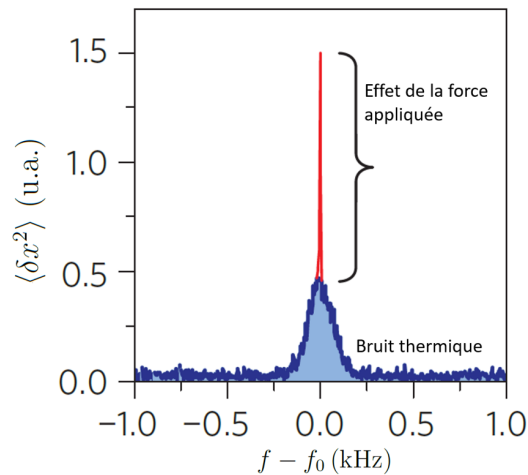


FIGURE 8 – **Expérience de mesure de force avec un nanotube de carbone.** Le bruit total de position, donné en unité arbitraire (u. a.), représente le bruit d’agitation thermique et l’effet d’une force appliquée. Figure tirée de l’article *Ultrasensitive force detection with a nanotube mechanical resonator*, Nature Nanotechnology **8**, 493 (2013).

#### IV-B Mesure de masse avec un nanotube

Dans une autre expérience, on observe la dérive de la fréquence de résonance mécanique d’un nanotube sur lequel se déposent des molécules de naphthalène ( $C_{10}H_8$ ). On observe sa première résonance à 2 GHz. La figure 9 présente l’évolution temporelle de la fréquence d’oscillation du nanotube. L’insert en haut à droite présente un modèle théorique de la variation de fréquence attendue en fonction du point  $z$  du dépôt de la molécule.

Le nanotube a ici une longueur  $L = 150 \pm 15$  nm (le deuxième nombre représente l’incertitude-type) et un diamètre  $a = 1,7 \pm 0,3$  nm (idem).

52. Calculer sa masse  $M$  avec son incertitude-type.
53. Interpréter les variations brusques de la fréquence de résonance. Vérifier qu’elles sont de l’ordre de grandeur attendu.
54. Pourquoi ces variations ne sont-elles pas toutes de la même valeur ? On pourra s’aider de l’insert de la figure 9, qui présente une prédiction théorique, dont on précisera la signification.
55. Expliquer pourquoi des mesures similaires, réalisées sur d’autres résonances du nanotube, permettent de préciser la mesure de masse. Que peut-on par exemple conclure si la résonance à 4 GHz a une variation de fréquence négligeable devant celle du mode à 2 GHz ?
56. Peut-on illustrer cette expérience avec un système {masse - ressort} ? Pourquoi une expérience avec un pendule pesant serait-elle plus appropriée pour illustrer les différentes valeurs observées pour les sauts de fréquence ?

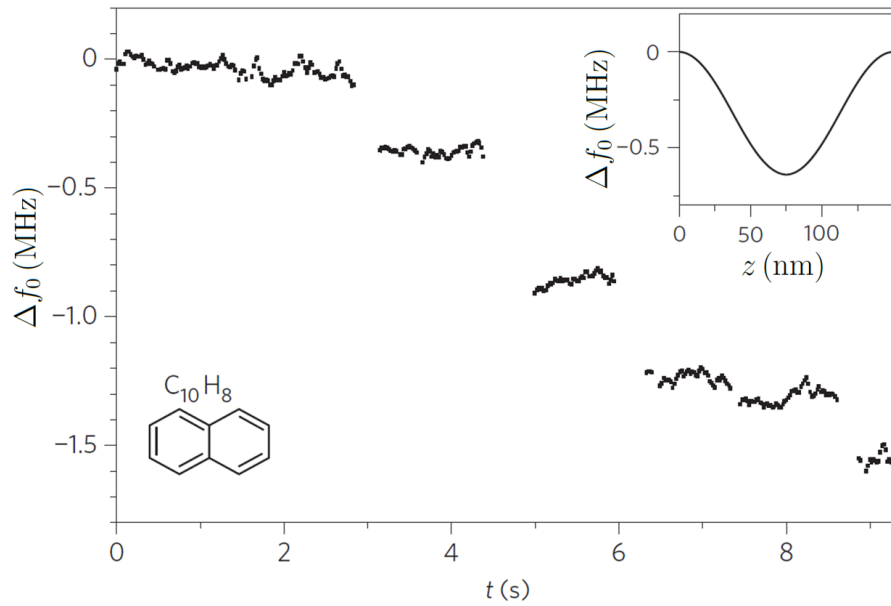


FIGURE 9 – Dérives observées de la fréquence de résonance mécanique du mode fondamental d'un nanotube de carbone. L'insert présente l'estimation théorique des variations de la fréquence en fonction de la position du point d'impact. La figure est tirée de la publication *A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution*, Nature Nanotechnology **7**, 301 (2012).

57. Qu'est-ce qui limite la sensibilité de cette mesure de fréquence ? En donner une estimation à partir de la figure 9.
58. Quelle est la durée typique entre deux sauts ? Combien de mesures sont typiquement réalisées dans l'intervalle ? Pourquoi l'article mentionne-t-il une valeur de la sensibilité environ dix fois inférieure à celle obtenue à la question précédente ?
59. Estimer la plus petite masse  $\delta m_{\min}$  que l'on peut mesurer avec ce dispositif et la comparer à une masse connue.

## Partie à dominante chimie

## L'azoture de sodium : de l'airbag à la chimie « click »


L'azoture de sodium  $\text{NaN}_3(\text{s})$  est une espèce chimique se présentant sous forme de cristaux hexagonaux incolores. Il est notamment utilisé comme source d'azote en chimie organique, comme conservateur en biologie, comme fongicide dans l'agroalimentaire. Ses propriétés explosives lui confèrent des applications aussi bien dans l'industrie des explosifs militaires (comme détonateur) que dans l'industrie automobile (au sein des airbags).

Ce sujet étudie quelques applications de l'azoture de sodium. Il se compose de plusieurs parties indépendantes.

Un ensemble de données numériques ainsi que plusieurs tables sont fournis au fil de l'énoncé ainsi qu'en annexe en page 10 et suivantes.

## I Étude structurale

Le document 1 propose des données d'après la page anglaise de Wikipédia sur l'azoture de sodium.

Document 1 :	
Propriétés	
Formule chimique	$\text{NaN}_3$
Masse molaire	$65,010 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Masse volumique	$1\,846 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )
Solubilité dans l'eau	$389 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (à $0 \text{ }^\circ\text{C}$ )
	$408 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )
	$553 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (à $100 \text{ }^\circ\text{C}$ )
Solubilité dans le méthanol	$24,8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ )
Constante d'acidité ( $\text{p}K_a$ )	4,8
Structure	
Structure cristalline	Hexagonale
Thermochimie (à $298 \text{ K}$ )	
Capacité thermique ( $C_p$ )	$76,6 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Entropie molaire standard ( $S_m^\circ$ )	$70,5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Enthalpie molaire standard de formation ( $\Delta_f H^\circ$ )	$21,3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Dangers	
Pictogrammes	
$\text{DL}_{50}$ [a]	$27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ par voie orale chez le rat

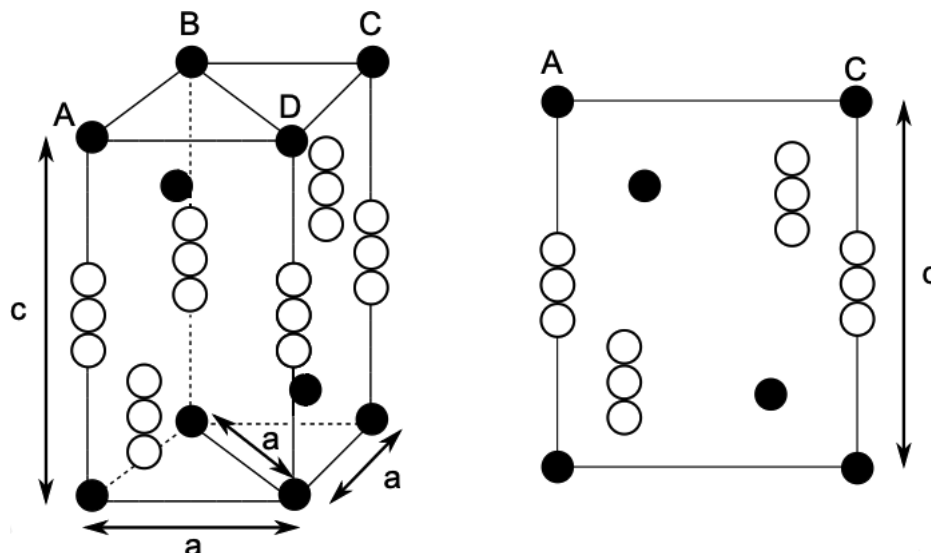
- Proposer plusieurs formes de Lewis limites (formes mésomères) pour l'ion azoture  $\text{N}_3^-$ . Sachant que l'ion présente deux liaisons azote-azote de  $115 \text{ pm}$  chacune, identifier la forme mésomère la plus représentative.
- Expliquer en quelques lignes le principe de la méthode VSEPR. Appliquer cette méthode pour déterminer la géométrie de l'ion azoture.
- Comparer la solubilité de l'azoture de sodium dans l'eau et dans le méthanol. Indiquer les caractéristiques des deux solvants qui peuvent expliquer la différence observée.

[a]. Dose létale à 50 % : dose moyenne suffisante pour tuer la moitié d'une population (ramenée à  $1 \text{ kg}$  d'animal).

4. Déterminer si la réaction de dissolution de l'azoture de sodium dans l'eau est endothermique ou exothermique. Justifier la réponse.

L'azoture de sodium cristallise à 298 K et sous 1 bar dans une maille hexagonale dont la structure est représentée dans le document 2.

**Document 2 :** Schéma de la maille de l'azoture de sodium :



À gauche : représentation tridimensionnelle.

À droite : coupe selon le plan bissecteur passant par les points A et C.

Disques blancs : atomes d'azote dans l'ion azoture.

Disques noirs : ions sodium ;  $a = 365,0 \text{ pm}$  ;  $c = 1\,520 \text{ pm}$  <sup>[b]</sup>.

5. Déterminer le nombre de motifs  $\text{NaN}_3$  appartenant en propre à chaque maille.  
6. Calculer la masse volumique de  $\text{NaN}_3(\text{s})$  et comparer à la valeur indiquée par Wikipédia.

## II Chimie de l'airbag

L'airbag est un dispositif de sécurité utilisé dans l'automobile. Il diminue le nombre d'accidents mortels d'environ 25 %.

Lors d'un choc frontal, une membrane souple se gonfle en moins de 50 ms grâce à l'injection d'un gaz généré par une réaction chimique explosive. La membrane est percée de petits trous appelés événements de sorte que l'airbag se dégonfle très vite après avoir joué son rôle amortisseur, évitant ainsi l'étouffement du passager.



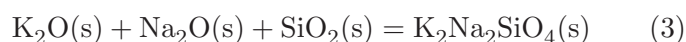
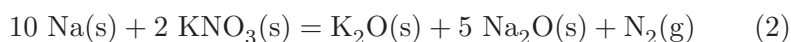
Chronophotographies du déploiement d'un airbag lors d'un test de collision <sup>[c]</sup>.

[b]. Source : G. E. Pringle, D. E. Noakes, *Acta Cryst.*, 1968, B24, 262.

Plusieurs types de générateurs de gaz existent. Nous allons étudier le cas où le générateur est une pastille solide composée d'azoture de sodium  $\text{NaN}_3(\text{s})$ , de nitrate de potassium  $\text{KNO}_3(\text{s})$  et de silice  $\text{SiO}_2(\text{s})$ . L'azoture de sodium se décompose chimiquement grâce à une impulsion électrique consécutive au choc.

7. Écrire l'équation ajustée de la réaction modélisant la décomposition de l'azoture de sodium solide sachant qu'elle libère du sodium solide et du diazote gazeux. Cette réaction est notée (1). Montrer que c'est une réaction d'oxydoréduction.
8. Définir l'enthalpie standard de formation d'une espèce chimique. Expliquer pourquoi les enthalpies standard de formation de  $\text{N}_2(\text{g})$  et de  $\text{Na}(\text{s})$  à 298 K sont nulles.
9. Calculer les valeurs de l'enthalpie standard et de l'entropie standard de la réaction (1) à 298 K. Commenter le signe des valeurs obtenues.
10. Calculer la valeur de la constante d'équilibre de la réaction (1) à 298 K.
11. Démontrer que, compte tenu de quelques hypothèses que l'on précisera, tout l'azoture de sodium est consommé lors du gonflement d'un airbag.

La réaction (1) produit du sodium métallique, espèce hautement réactive. Le nitrate de potassium associé à la silice permet de le transformer rapidement en oxyde de sodium  $\text{Na}_2\text{O}(\text{s})$ , puis en un sel inoffensif  $\text{K}_2\text{Na}_2\text{SiO}_4(\text{s})$  selon les réactions (2) et (3) suivantes :



On considérera que  $\text{KNO}_3(\text{s})$  et  $\text{SiO}_2(\text{s})$  sont en excès.

12. Donner la configuration électronique de l'atome de sodium. Justifier le caractère très réactif du sodium métallique.
13. Calculer la masse d'azoture de sodium qu'il faut utiliser pour gonfler un airbag de 60 L à une température de 20 °C et sous une pression 1 bar. On négligera la quantité initiale de diazote par rapport à celles produites lors du déclenchement de l'airbag.

### III Titrage de l'azoture de sodium

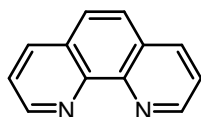
Bien que l'azoture de sodium soit une espèce très toxique, peu de cas d'intoxications liés à sa présence dans les airbags ont été rapportés. Les intoxications sévères (dont la mortalité dépasse les 50 %) sont plutôt dues à des ingestions suicidaires ou homicidaires. Les laboratoires de toxicologie et les instituts médico-légaux ont donc été amenés à développer des méthodes de dosage des ions azoture dans les tissus biologiques<sup>[d]</sup>. Le protocole présenté dans le document 3 fait partie de ces méthodes.

---

[c]. Source : Daimler Chrysler.

[d]. Source : J.-P. Gaulier, L. Pouché, F. Lamballais, E. Saussereau, A. Tracqui, J.-P. Goullé, G. Lachâtre, *Ann Toxicol Anal.*, **2012**, 24, p. 17.

**Document 3 :** 5 g de tissus biologiques sont prélevés puis broyés et placés dans 100 mL d'eau distillée acidifiée à  $pH = 2$ . Sont ensuite ajoutés 10,0 mL d'une solution, acidifiée de la même façon, de nitrate de cérium(IV) ( $Ce^{4+}$ ,  $4NO_3^-$ ) à la concentration  $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$ . Un dégagement gazeux de  $N_2(g)$  est observé. Quelques gouttes d'une solution éthanolique concentrée d'orthophénanthroline (notée phen) sont introduites, puis l'ensemble est titré par une solution de sel de Mohr<sup>[e]</sup> contenant des ions  $Fe^{2+}$  à la concentration  $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$ . Un changement de couleur de la solution est observée pour 9,35 mL de réactif titrant versé.



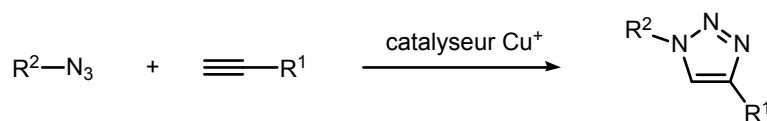
Structure de l'orthophénanthroline (phen).

- Écrire l'équation de la réaction qui a lieu lors de l'ajout des ions cérium(IV), sachant que les ions  $N_3^-$  sont transformés en  $HN_3$  en milieu si acide. Calculer sa constante d'équilibre à 298 K et commenter.
- Expliquer le principe du dosage en précisant l'équation de la réaction de titrage ainsi que la couleur de la solution avant et après l'équivalence. Calculer la valeur de la constante d'équilibre de la réaction responsable de ce changement de couleur.
- En déduire la teneur massique en  $NaN_3$  dans les tissus analysés. Argumenter quant à un empoisonnement possible par de l'azoture de sodium.

## IV Chimie « click »

L'azoture de sodium est un réactif classique de la chimie organique. Il permet, par exemple, de réaliser des réactions d'amination par hydrogénation catalytique du groupe azoture. Depuis quelques années, il connaît un engouement exceptionnel avec le développement de la chimie « click » comme illustré dans les documents 4 et 5.

**Document 4 :** Depuis 2002, la chimie « click » a conquis le monde de la synthèse. Ce concept original, s'appliquant à des réactions rapides, efficaces, sélectives et polyvalentes, a permis de nouvelles opportunités, en particulier dans la création de nouveaux agents thérapeutiques. La cycloaddition 1,3-dipolaire entre un alcyne terminal  $R^1-C\equiv C-H$  et un azoture  $R^2-N_3$ , catalysée par le cuivre(I), est la réaction la plus utilisée de la chimie « click » :



Ses principales applications, liées à la fonction 1,2,3-triazole générée, concernent la biochimie, les sciences de la matière et des polymères, et la découverte de nouveaux médicaments<sup>[f]</sup>.

[e]. Le sel de Mohr  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  est couramment utilisé comme source d'ions fer(II).

[f]. Source : R. Lucas, R. Zerrouki, P. Krausz, *L'Act. Chim.*, **2009**, 335, p. 5.

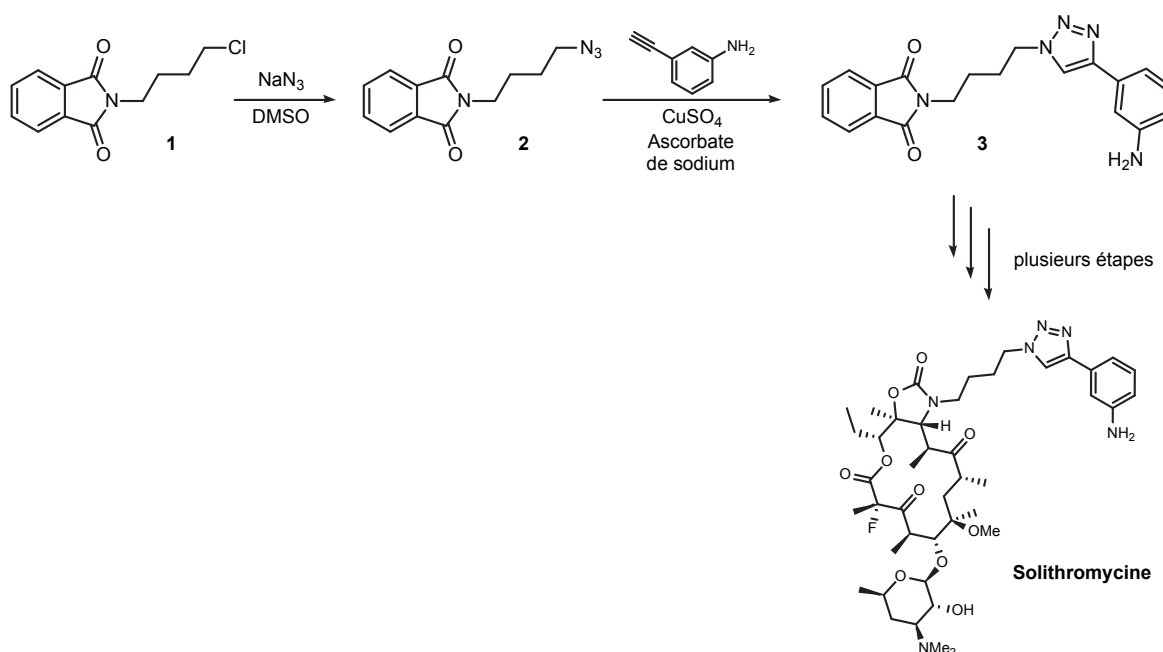
**Document 5** : Illustration graphique de la réaction « click » (nom donné en référence au bruit lors du bouclage d'une ceinture de sécurité) [g] :



### Étude de la réaction d'introduction du groupe azoture

Le groupe fonctionnel azoture  $N_3$  est généralement introduit *via* une réaction de substitution nucléophile à partir d'un dérivé halogéné primaire et d'azoture de sodium comme illustré dans la première étape la synthèse de la Solithromycine, un principe actif antibiotique, présentée dans le document 6.

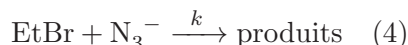
**Document 6** : Extrait de la synthèse de la Solithromycine brevetée en 2017 [h].



[g]. Source : D. Guianvarc'h, C. Biot, B. Vauzeilles, *L'Act. Chim.*, 2022, 478, p. 6.

[h]. Source : A. Cusak, N. Maras, *Brevet EP 3190122A1*, 2017.

Dans cette partie, on va chercher à déterminer la loi de vitesse de la réaction de substitution nucléophile sur un dérivé halogéné primaire. Pour cela, on étudie la réaction (4) entre l'ion azoture et le bromoéthane utilisé comme modèle de dérivé halogéné primaire :



Le document 7 décrit un protocole expérimental possible pour cette étude ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

**Document 7 :**  $2,0 \times 10^{-4}$  mol de bromoéthane est dissous dans 100 mL d'une solution méthanolique d'azoture de sodium de concentration  $c = 0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . Le milieu réactionnel est thermostaté à 25 °C.

À différents instants  $t$ , 1 mL du milieu réactionnel est prélevé et transféré dans un bécher. 10 mL d'une solution d'acide sulfurique à  $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  sont ajoutés rapidement puis le mélange est titré par une solution de nitrate d'argent de concentration  $1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . Le volume équivalent  $V_{\text{éq}}$  est mesuré en suivant la conductivité corrigée de la dilution  $\sigma'$  au cours du titrage :

$t / \text{min}$	0	8	25	50	85	127	160	1500
$V_{\text{éq}} / \text{mL}$	0	0,7	2,0	3,9	6,3	8,5	10,1	20,0

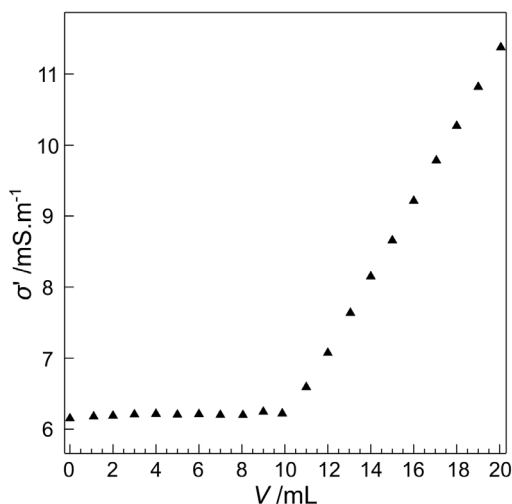
17. Indiquer la nature des produits de la réaction (4).

On suppose que la réaction de substitution nucléophile admet une loi de vitesse de la forme :

$$v = k[\text{EtBr}]^\alpha [\text{N}_3^-]^\beta$$

- Montrer que le protocole proposé dans le document 7 permet uniquement d'accéder à l'ordre partiel par rapport à l'un des réactifs. En déduire l'expression de la vitesse de la réaction en fonction d'une constante de vitesse apparente notée  $k_{\text{app}}$  et de la concentration de ce réactif.
- Le dosage est réalisé en milieu acide. Proposer deux raisons justifiant ce choix.
- Préciser les instruments de verrerie qui doivent être utilisés pour prélever d'une part 1 mL du milieu réactionnel et d'autre part 10 mL de la solution d'acide sulfurique.
- Expliquer l'objectif du titrage par le nitrate d'argent. Préciser la réaction de titrage et en déduire la relation entre la concentration en EtBr à l'instant  $t$  et le volume équivalent.
- Compte tenu de la valeur du volume équivalent mesuré pour  $t = 1500 \text{ min}$  (noté  $V_{\text{éq}}^\infty$ ), que peut-on dire de la réaction de substitution nucléophile (4) dans les conditions indiquées ?

Pour  $t = 160 \text{ s}$ , le tracé de la conductivité corrigée de la dilution  $\sigma'$  en fonction du volume  $V$  est reporté ci-dessous.



23. Expliciter l'expression de  $\sigma'$  en fonction de la conductivité  $\sigma$ , du volume de réactif titrant ajouté  $V$  et du volume initial contenu dans le bécher  $V_0$ . Expliquer l'intérêt de tracer la fonction  $\sigma'$  en fonction de  $V$  au lieu de  $\sigma$ .
24. Justifiant l'allure de l'évolution de  $\sigma'$  en fonction de  $V$ .

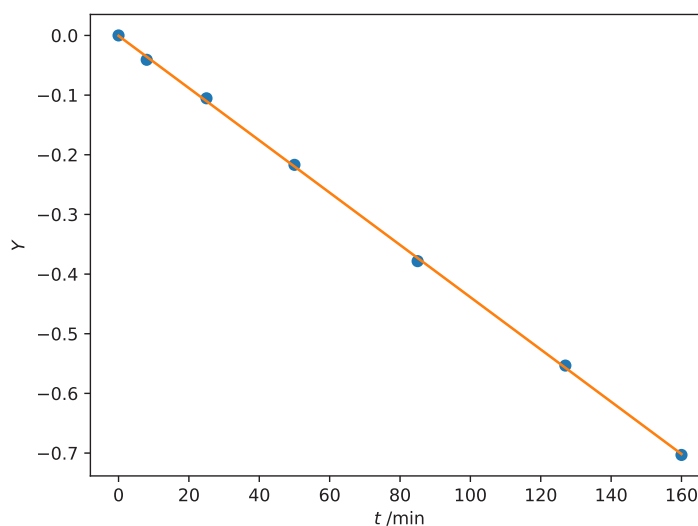
Le programme Python ci-dessous a été écrit pour traiter les données expérimentales présentées dans le document 7.

```

1 # Bibliothèques
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy.random as rd
5
6 # Données
7 t = np.array([0, 8, 25, 50, 85, 127, 160]) #/min
8 Veq = np.array([0, 0.8, 2.0, 3.9, 6.3, 8.5, 10.1]) #/mL
9
10 Veq_infty = 20 #mL
11
12 # Regression lineaire et traces
13 Y = np.log(1-Veq/Veq_infty)
14 plt.plot(t,Y,'o')
15 plt.xlabel('$t$ /min')
16 plt.ylabel('$Y$')
17
18 a_reg, b_reg = np.polyfit(t,Y,1)
19 print(a_reg)
20
21 plt.plot(t, a_reg*t+b_reg, '-')
22 plt.show()

```

Après compilation, la valeur  $-0.004381664671380\dots$  s'affiche à l'écran ainsi que la figure suivante :



25. Dédurre du graphe obtenu la valeur de l'ordre partiel par rapport à l'un des réactifs en justifiant le choix de la fonction tracée.
26. Proposer une ligne de code permettant d'afficher la valeur de  $k_{app}$  ainsi que son unité.

La détermination de l'incertitude-type sur  $k_{app}$  a été réalisée grâce à la méthode de Monte-Carlo. Le code Python utilisé est recopié ci-dessous :

```

1 # Incertitudes-types sur les volumes equivalents et sur les temps
2 u_Veq = 0.10 #mL
3 u_t = 0.5 #min
4
5 # Simulation de Monte-Carlo
6 N = 10 000
7 kapp_MC = []
8
9 for i in range(N):
10     Veq_MC = rd.normal(Veq, u_Veq)
11     t_MC = rd.normal(t, u_t)
12     Y_MC = np.log(1-Veq_MC/Veq_infty)
13     a_reg_MC, b_reg_MC = np.polyfit(t_MC, Y_MC, 1)
14     kapp_MC.append(-a_reg_MC)
15
16 u_a = np.std(kapp_MC, ddof = 1)
17
18 print("u(k_app) = ", u_a, 'min^-1')

```

27. Expliquer le principe de la méthode de Monte-Carlo mis en jeu ici. On pourra se référer aux numéros des lignes de code indiqués.

Après une première compilation, la ligne  $u(k_{app}) = 5.564\ 380\ 235\ 742\ 132e-05\ \text{min}^{-1}$  s'affiche à l'écran. Une deuxième donne  $u(k_{app}) = 5.615\ 617\ 598\ 481\ 374e-05\ \text{min}^{-1}$  et une troisième donne  $u(k_{app}) = 5.591\ 379\ 684\ 147\ 843e-05\ \text{min}^{-1}$ .

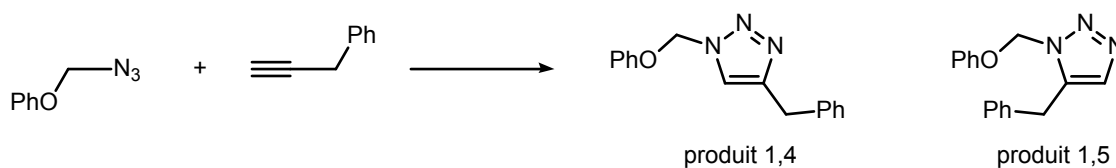
28. Écrire de manière adaptée la valeur de  $k_{app}$  assortie de son incertitude-type.

29. Expliquer comment il serait possible de déterminer expérimentalement l'ordre partiel par rapport à l'autre réactif.

### Étude de la réaction « click »

La réaction entre un alcyne terminal  $R^1-C\equiv C-H$  et un azoture  $R^2-N_3$  sous activation thermique conduit à deux isomères de constitution. L'utilisation d'un catalyseur à base d'ions cuivre(I) rend la réaction sélective comme illustré dans le document 8.

**Document 8** : Comparaison de la sélectivité de la réaction « click » selon les conditions opératoires [i]. Les pourcentages sont entendus en quantité de matière.



Conditions opératoires	Produit 1,4	Produit 1,5
92 °C, 18 h	62 %	38 %
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O [j] (1 %)		
Ascorbate de sodium, C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> NaO <sub>6</sub> (5 %)	100 %	0
H <sub>2</sub> O/tBuOH [k] (2 : 1), 25 °C, 8 h		

30. Indiquer la relation d'isomérisie qui relie les produits 1,4 et 1,5. En déduire un qualificatif de la sélectivité de la transformation.

[i]. Source : V. V. Rostovtsev, L. G. Green, V. V. Fokin, K. B. Sharpless *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2002**, *41*, p. 2596.

[j]. CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O correspond à du sulfate de cuivre pentahydraté.

[k]. tBuOH est du tertiobutanol ou 2-méthylpropan-2-ol.

31. Rappeler la définition d'un catalyseur.
32. En s'appuyant sur le diagramme  $E-pH$  donné en annexe, expliquer le rôle de l'ascorbate de sodium indiqué dans les conditions opératoires données dans le document 8. Préciser dans quelle gamme de  $pH$  il convient de se placer pour que ce réactif joue son rôle.
33. Proposer, pour la transformation indiquée dans le document 8, un mécanisme à l'aide de flèches courbes rationalisant les réarrangements électroniques conduisant au produit majoritaire.

La spectre de RMN du proton du produit majoritaire obtenu lors de la transformation indiquée dans le document 8 est décrit dans le tableau suivant (fréquence de l'appareil : 400 MHz pour le proton ; solvant : chloroforme deutéré  $CDCl_3$ ) :

$\delta$ /ppm	Intégration	Multiplicité
5,15	2 H	singulet
5,49	2 H	singulet
6,93	3 H	multiplet
7,24	4 H	multiplet
7,34	3 H	multiplet
7,50	1 H	singulet

34. Expliquer l'intérêt d'utiliser du chloroforme deutéré comme solvant.
35. Attribuer les signaux à 5,15 ppm, 5,49 ppm et 7,50 ppm. Justifier les valeurs relatives des déplacements chimiques des protons résonnant à 5,15 et 5,49 ppm.

## Annexe

Dans l'ensemble du sujet, la notation  $V_{ESH}$  signifie que le potentiel ou la tension associée est mesurée en volts par rapport à l'électrode standard à hydrogène.

### Constantes physiques

- Constante d'Avogadro :  $\mathcal{N}_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ;
- Constante de Faraday :  $\mathcal{F} = 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- Constante des gaz parfaits  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- $\frac{RT \ln 10}{\mathcal{F}} = 0,06 \text{ V}$  à 298 K ;
- Charge élémentaire :  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  ;
- Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ;
- Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

### Enthalpies standard de formation et entropies molaires standard à 298 K

	Na(s)	N <sub>2</sub> (g)
$\Delta_f H^\circ / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	0	0
$S_m^\circ / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	51,3	192

### Constantes d'acidité à 298 K

	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (aq)/HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq)	HCl(aq)/Cl <sup>-</sup> (aq)	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq)/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (aq)	HN <sub>3</sub> (aq)/N <sub>3</sub> <sup>-</sup> (aq)
$pK_a$	< 0	< 0	1,8	4,8

### Constantes de solubilité à 298 K

	AgBr(s)	Ag <sub>2</sub> O(s)
$pK_s$	12,3	15,2

### Conductivités ioniques molaires à dilution infinie à 298 K

	Ag <sup>+</sup> (aq)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (aq)	Br <sup>-</sup> (aq)
$\lambda^\circ / \text{mS} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$	6,19	7,14	7,81

### Constante globale de formation de complexe à 298 K

	[Fe(phen) <sub>3</sub> ] <sup>2+</sup> (aq)	[Fe(phen) <sub>3</sub> ] <sup>3+</sup> (aq)
$\log \beta$	21,3	14,1

### Potentiels d'oxydoréduction standard à 298 K

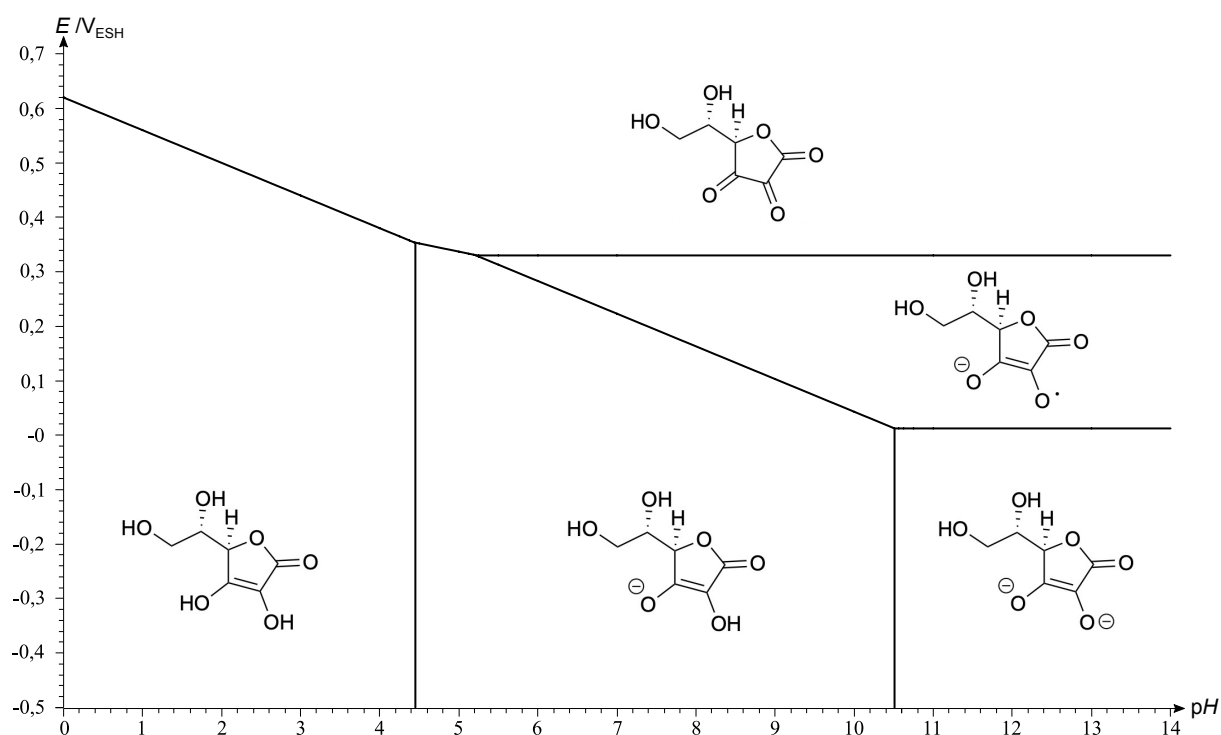
	N <sub>2</sub> (g)/HN <sub>3</sub> (aq)	Cu <sup>2+</sup> (aq)/Cu <sup>+</sup> (aq)	Cu <sup>+</sup> (aq)/Cu(s)	Ce <sup>4+</sup> (aq)/Ce <sup>3+</sup> (aq)
$E^\circ / V_{ESH}^{[i]}$	-3,09	0,168	0,507	1,84

	[Fe(phen) <sub>3</sub> ] <sup>3+</sup> (aq)/[Fe(phen) <sub>3</sub> ] <sup>2+</sup> (aq) bleu pâle      rouge sang
$E^\circ / V_{ESH}$	1,06

## Documentation NumPy <sup>[1]</sup>

Commande	Documentation
<code>numpy.polyfit(x, y, deg)</code>	Fit a polynomial $p(x) = p[0] * x^{deg} + \dots + p[deg]$ of degree <i>deg</i> to points ( <i>x</i> , <i>y</i> ). Returns a vector of coefficients <i>p</i> that minimises the squared error in the order <i>deg</i> , <i>deg</i> -1, <i>deg</i> -2, ..., 0.
<code>numpy.random.normal(loc, scale)</code>	Draw random samples from a normal (Gaussian) distribution with <i>loc</i> as the centre of the distribution and <i>scale</i> as the standard deviation of the distribution.
<code>numpy.std(a)</code>	Returns the standard deviation of the array elements <i>a</i> .
<code>numpy.log(a)</code>	Returns the natural logarithm of <i>a</i> (the inverse of the exponential function).

## Diagramme potentiel-pH de l'acide ascorbique



Toutes les espèces sont entièrement solubilisées dans l'eau.

Conventions de tracé : égalité des concentrations en solutés aux frontières et une concentration totale en espèces de  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

[1]. Source : <https://numpy.org/doc/stable/index.html>

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

		Masse atomique																																																																																																																																																																																																																																									
1	<b>H</b> Hydrogène 1,008	2	<b>He</b> Hélium 4,00	3	<b>Li</b> Lithium 6,94	4	<b>Be</b> Béryllium 9,01	5	<b>B</b> Bore 10,81	6	<b>C</b> Carbone 12,01	7	<b>N</b> Azote 14,01	8	<b>O</b> Oxygène 16,00	9	<b>F</b> Fluor 19,00	10	<b>Ne</b> Néon 20,18	11	<b>Na</b> Sodium 22,99	12	<b>Mg</b> Magnésium 24,31	13	<b>Al</b> Aluminium 26,98	14	<b>Si</b> Silicium 28,09	15	<b>P</b> Phosphore 30,97	16	<b>S</b> Soufre 32,06	17	<b>Cl</b> Chlore 35,45	18	<b>Ar</b> Argon 39,95	19	<b>K</b> Potassium 39,10	20	<b>Ca</b> Calcium 40,08	21	<b>Sc</b> Scandium 44,96	22	<b>Ti</b> Titane 47,87	23	<b>V</b> Vanadium 50,94	24	<b>Cr</b> Chrome 52,00	25	<b>Mn</b> Manganèse 54,94	26	<b>Fe</b> Fer 55,85	27	<b>Co</b> Cobalt 58,93	28	<b>Ni</b> Nickel 58,69	29	<b>Cu</b> Cuivre 63,55	30	<b>Zn</b> Zinc 65,38	31	<b>Ga</b> Gallium 68,72	32	<b>Ge</b> Germanium 72,63	33	<b>As</b> Arsenic 74,92	34	<b>Se</b> Sélénium 78,96	35	<b>Br</b> Brome 79,90	36	<b>Kr</b> Krypton 83,80	37	<b>Rb</b> Rubidium 85,47	38	<b>Sr</b> Strontium 87,62	39	<b>Y</b> Yttrium 88,91	40	<b>Zr</b> Zirconium 91,22	41	<b>Nb</b> Niobium 92,91	42	<b>Mo</b> Molybdène 95,96	43	<b>Tc</b> Technétium [98]	44	<b>Ru</b> Ruthénium 101,07	45	<b>Rh</b> Rhodium 102,91	46	<b>Pd</b> Palladium 106,42	47	<b>Ag</b> Argent 107,87	48	<b>Cd</b> Cadmium 112,41	49	<b>In</b> Indium 114,82	50	<b>Sn</b> Étain 118,71	51	<b>Sb</b> Antimoine 121,76	52	<b>Te</b> Tellure 127,60	53	<b>I</b> Iode 126,90	54	<b>Xe</b> Xénon 131,29	55	<b>Cs</b> Césium 132,91	56	<b>Ba</b> Baryum 137,33	57	<b>* La</b> Lanthane	72	<b>Hf</b> Hafnium 178,49	73	<b>Ta</b> Tantale 180,95	74	<b>W</b> Tungstène 183,84	75	<b>Re</b> Rhénium 186,21	76	<b>Os</b> Osmium 190,23	77	<b>Ir</b> Iridium 192,22	78	<b>Pt</b> Platine 195,08	79	<b>Au</b> Or 196,97	80	<b>Hg</b> Mercure 200,59	81	<b>Tl</b> Thallium 204,38	82	<b>Pb</b> Plomb 207,2	83	<b>Bi</b> Bismuth 208,98	84	<b>Po</b> Polonium [209]	85	<b>At</b> Astate [210]	86	<b>Rn</b> Radon [222]	87	<b>Fr</b> Francium [223]	88	<b>Ra</b> Radium [226]	89	<b>** AC</b> Actinium	104	<b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105	<b>Db</b> Dubnium [268]	106	<b>Sg</b> Seaborgium [271]	107	<b>Bh</b> Bohrium [272]	108	<b>Hs</b> Hassium [277]	109	<b>Mt</b> Meitnerium [276]	110	<b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111	<b>Rg</b> Roentgenium [280]	112	<b>Cn</b> Copernicium [285]	113	<b>Nh</b> Nihonium [286]	114	<b>Fl</b> Flerovium [289]	115	<b>Mc</b> Moscovium [288]	116	<b>Lv</b> Livermorium [293]	117	<b>Ts</b> Tennessium [294]	118	<b>Og</b> Oganesson [294]	58	<b>Ce</b> Cérium 140,12	59	<b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60	<b>Nd</b> Néodyme 144,24	61	<b>Pm</b> Prométhium [145]	62	<b>Sm</b> Samarium 150,36	63	<b>Eu</b> Europium 151,96	64	<b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65	<b>Tb</b> Terbium 158,93	66	<b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67	<b>Ho</b> Holmium 164,93	68	<b>Er</b> Erbium 167,26	69	<b>Tm</b> Thulium 168,93	70	<b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71	<b>Lu</b> Lutécium 174,97	90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]
11	<b>Na</b> Sodium 22,99	12	<b>Mg</b> Magnésium 24,31	13	<b>Al</b> Aluminium 26,98	14	<b>Si</b> Silicium 28,09	15	<b>P</b> Phosphore 30,97	16	<b>S</b> Soufre 32,06	17	<b>Cl</b> Chlore 35,45	18	<b>Ar</b> Argon 39,95	19	<b>K</b> Potassium 39,10	20	<b>Ca</b> Calcium 40,08	21	<b>Sc</b> Scandium 44,96	22	<b>Ti</b> Titane 47,87	23	<b>V</b> Vanadium 50,94	24	<b>Cr</b> Chrome 52,00	25	<b>Mn</b> Manganèse 54,94	26	<b>Fe</b> Fer 55,85	27	<b>Co</b> Cobalt 58,93	28	<b>Ni</b> Nickel 58,69	29	<b>Cu</b> Cuivre 63,55	30	<b>Zn</b> Zinc 65,38	31	<b>Ga</b> Gallium 68,72	32	<b>Ge</b> Germanium 72,63	33	<b>As</b> Arsenic 74,92	34	<b>Se</b> Sélénium 78,96	35	<b>Br</b> Brome 79,90	36	<b>Kr</b> Krypton 83,80	37	<b>Rb</b> Rubidium 85,47	38	<b>Sr</b> Strontium 87,62	39	<b>Y</b> Yttrium 88,91	40	<b>Zr</b> Zirconium 91,22	41	<b>Nb</b> Niobium 92,91	42	<b>Mo</b> Molybdène 95,96	43	<b>Tc</b> Technétium [98]	44	<b>Ru</b> Ruthénium 101,07	45	<b>Rh</b> Rhodium 102,91	46	<b>Pd</b> Palladium 106,42	47	<b>Ag</b> Argent 107,87	48	<b>Cd</b> Cadmium 112,41	49	<b>In</b> Indium 114,82	50	<b>Sn</b> Étain 118,71	51	<b>Sb</b> Antimoine 121,76	52	<b>Te</b> Tellure 127,60	53	<b>I</b> Iode 126,90	54	<b>Xe</b> Xénon 131,29	55	<b>Cs</b> Césium 132,91	56	<b>Ba</b> Baryum 137,33	57	<b>* La</b> Lanthane	72	<b>Hf</b> Hafnium 178,49	73	<b>Ta</b> Tantale 180,95	74	<b>W</b> Tungstène 183,84	75	<b>Re</b> Rhénium 186,21	76	<b>Os</b> Osmium 190,23	77	<b>Ir</b> Iridium 192,22	78	<b>Pt</b> Platine 195,08	79	<b>Au</b> Or 196,97	80	<b>Hg</b> Mercure 200,59	81	<b>Tl</b> Thallium 204,38	82	<b>Pb</b> Plomb 207,2	83	<b>Bi</b> Bismuth 208,98	84	<b>Po</b> Polonium [209]	85	<b>At</b> Astate [210]	86	<b>Rn</b> Radon [222]	87	<b>Fr</b> Francium [223]	88	<b>Ra</b> Radium [226]	89	<b>** AC</b> Actinium	104	<b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105	<b>Db</b> Dubnium [268]	106	<b>Sg</b> Seaborgium [271]	107	<b>Bh</b> Bohrium [272]	108	<b>Hs</b> Hassium [277]	109	<b>Mt</b> Meitnerium [276]	110	<b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111	<b>Rg</b> Roentgenium [280]	112	<b>Cn</b> Copernicium [285]	113	<b>Nh</b> Nihonium [286]	114	<b>Fl</b> Flerovium [289]	115	<b>Mc</b> Moscovium [288]	116	<b>Lv</b> Livermorium [293]	117	<b>Ts</b> Tennessium [294]	118	<b>Og</b> Oganesson [294]	58	<b>Ce</b> Cérium 140,12	59	<b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60	<b>Nd</b> Néodyme 144,24	61	<b>Pm</b> Prométhium [145]	62	<b>Sm</b> Samarium 150,36	63	<b>Eu</b> Europium 151,96	64	<b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65	<b>Tb</b> Terbium 158,93	66	<b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67	<b>Ho</b> Holmium 164,93	68	<b>Er</b> Erbium 167,26	69	<b>Tm</b> Thulium 168,93	70	<b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71	<b>Lu</b> Lutécium 174,97	90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]																				
37	<b>Rb</b> Rubidium 85,47	38	<b>Sr</b> Strontium 87,62	39	<b>Y</b> Yttrium 88,91	40	<b>Zr</b> Zirconium 91,22	41	<b>Nb</b> Niobium 92,91	42	<b>Mo</b> Molybdène 95,96	43	<b>Tc</b> Technétium [98]	44	<b>Ru</b> Ruthénium 101,07	45	<b>Rh</b> Rhodium 102,91	46	<b>Pd</b> Palladium 106,42	47	<b>Ag</b> Argent 107,87	48	<b>Cd</b> Cadmium 112,41	49	<b>In</b> Indium 114,82	50	<b>Sn</b> Étain 118,71	51	<b>Sb</b> Antimoine 121,76	52	<b>Te</b> Tellure 127,60	53	<b>I</b> Iode 126,90	54	<b>Xe</b> Xénon 131,29	55	<b>Cs</b> Césium 132,91	56	<b>Ba</b> Baryum 137,33	57	<b>* La</b> Lanthane	72	<b>Hf</b> Hafnium 178,49	73	<b>Ta</b> Tantale 180,95	74	<b>W</b> Tungstène 183,84	75	<b>Re</b> Rhénium 186,21	76	<b>Os</b> Osmium 190,23	77	<b>Ir</b> Iridium 192,22	78	<b>Pt</b> Platine 195,08	79	<b>Au</b> Or 196,97	80	<b>Hg</b> Mercure 200,59	81	<b>Tl</b> Thallium 204,38	82	<b>Pb</b> Plomb 207,2	83	<b>Bi</b> Bismuth 208,98	84	<b>Po</b> Polonium [209]	85	<b>At</b> Astate [210]	86	<b>Rn</b> Radon [222]	87	<b>Fr</b> Francium [223]	88	<b>Ra</b> Radium [226]	89	<b>** AC</b> Actinium	104	<b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105	<b>Db</b> Dubnium [268]	106	<b>Sg</b> Seaborgium [271]	107	<b>Bh</b> Bohrium [272]	108	<b>Hs</b> Hassium [277]	109	<b>Mt</b> Meitnerium [276]	110	<b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111	<b>Rg</b> Roentgenium [280]	112	<b>Cn</b> Copernicium [285]	113	<b>Nh</b> Nihonium [286]	114	<b>Fl</b> Flerovium [289]	115	<b>Mc</b> Moscovium [288]	116	<b>Lv</b> Livermorium [293]	117	<b>Ts</b> Tennessium [294]	118	<b>Og</b> Oganesson [294]	58	<b>Ce</b> Cérium 140,12	59	<b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60	<b>Nd</b> Néodyme 144,24	61	<b>Pm</b> Prométhium [145]	62	<b>Sm</b> Samarium 150,36	63	<b>Eu</b> Europium 151,96	64	<b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65	<b>Tb</b> Terbium 158,93	66	<b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67	<b>Ho</b> Holmium 164,93	68	<b>Er</b> Erbium 167,26	69	<b>Tm</b> Thulium 168,93	70	<b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71	<b>Lu</b> Lutécium 174,97	90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]																																																																								
55	<b>Cs</b> Césium 132,91	56	<b>Ba</b> Baryum 137,33	57	<b>* La</b> Lanthane	72	<b>Hf</b> Hafnium 178,49	73	<b>Ta</b> Tantale 180,95	74	<b>W</b> Tungstène 183,84	75	<b>Re</b> Rhénium 186,21	76	<b>Os</b> Osmium 190,23	77	<b>Ir</b> Iridium 192,22	78	<b>Pt</b> Platine 195,08	79	<b>Au</b> Or 196,97	80	<b>Hg</b> Mercure 200,59	81	<b>Tl</b> Thallium 204,38	82	<b>Pb</b> Plomb 207,2	83	<b>Bi</b> Bismuth 208,98	84	<b>Po</b> Polonium [209]	85	<b>At</b> Astate [210]	86	<b>Rn</b> Radon [222]	87	<b>Fr</b> Francium [223]	88	<b>Ra</b> Radium [226]	89	<b>** AC</b> Actinium	104	<b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105	<b>Db</b> Dubnium [268]	106	<b>Sg</b> Seaborgium [271]	107	<b>Bh</b> Bohrium [272]	108	<b>Hs</b> Hassium [277]	109	<b>Mt</b> Meitnerium [276]	110	<b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111	<b>Rg</b> Roentgenium [280]	112	<b>Cn</b> Copernicium [285]	113	<b>Nh</b> Nihonium [286]	114	<b>Fl</b> Flerovium [289]	115	<b>Mc</b> Moscovium [288]	116	<b>Lv</b> Livermorium [293]	117	<b>Ts</b> Tennessium [294]	118	<b>Og</b> Oganesson [294]	58	<b>Ce</b> Cérium 140,12	59	<b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60	<b>Nd</b> Néodyme 144,24	61	<b>Pm</b> Prométhium [145]	62	<b>Sm</b> Samarium 150,36	63	<b>Eu</b> Europium 151,96	64	<b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65	<b>Tb</b> Terbium 158,93	66	<b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67	<b>Ho</b> Holmium 164,93	68	<b>Er</b> Erbium 167,26	69	<b>Tm</b> Thulium 168,93	70	<b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71	<b>Lu</b> Lutécium 174,97	90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]																																																																																																												
87	<b>Fr</b> Francium [223]	88	<b>Ra</b> Radium [226]	89	<b>** AC</b> Actinium	104	<b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105	<b>Db</b> Dubnium [268]	106	<b>Sg</b> Seaborgium [271]	107	<b>Bh</b> Bohrium [272]	108	<b>Hs</b> Hassium [277]	109	<b>Mt</b> Meitnerium [276]	110	<b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111	<b>Rg</b> Roentgenium [280]	112	<b>Cn</b> Copernicium [285]	113	<b>Nh</b> Nihonium [286]	114	<b>Fl</b> Flerovium [289]	115	<b>Mc</b> Moscovium [288]	116	<b>Lv</b> Livermorium [293]	117	<b>Ts</b> Tennessium [294]	118	<b>Og</b> Oganesson [294]	58	<b>Ce</b> Cérium 140,12	59	<b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60	<b>Nd</b> Néodyme 144,24	61	<b>Pm</b> Prométhium [145]	62	<b>Sm</b> Samarium 150,36	63	<b>Eu</b> Europium 151,96	64	<b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65	<b>Tb</b> Terbium 158,93	66	<b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67	<b>Ho</b> Holmium 164,93	68	<b>Er</b> Erbium 167,26	69	<b>Tm</b> Thulium 168,93	70	<b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71	<b>Lu</b> Lutécium 174,97	90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]																																																																																																																																																
58	<b>Ce</b> Cérium 140,12	59	<b>Pr</b> Praséodyme 140,91	60	<b>Nd</b> Néodyme 144,24	61	<b>Pm</b> Prométhium [145]	62	<b>Sm</b> Samarium 150,36	63	<b>Eu</b> Europium 151,96	64	<b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65	<b>Tb</b> Terbium 158,93	66	<b>Dy</b> Dysprosium 162,50	67	<b>Ho</b> Holmium 164,93	68	<b>Er</b> Erbium 167,26	69	<b>Tm</b> Thulium 168,93	70	<b>Yb</b> Ytterbium 173,05	71	<b>Lu</b> Lutécium 174,97	90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]																																																																																																																																																																																				
90	<b>Th</b> Thorium 232,04	91	<b>Pa</b> Protactinium 231,04	92	<b>U</b> Uranium 238,03	93	<b>Np</b> Neptunium [237]	94	<b>Pu</b> Plutonium [244]	95	<b>Am</b> Américium [243]	96	<b>Cm</b> Curium [247]	97	<b>Bk</b> Berkélium [247]	98	<b>Cf</b> Californium [251]	99	<b>Es</b> Einsteinium [252]	100	<b>Fm</b> Fermium [257]	101	<b>Md</b> Mendésélium [258]	102	<b>No</b> Nobélium [259]	103	<b>Lr</b> Lawrencium [262]																																																																																																																																																																																																																