MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE, DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE

EAI PHC 1

SESSION 2015

AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER

Section : PHYSIQUE CHIMIE

COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

L'eau sous tension

Le fil directeur de ce problème est la métastabilité des transitions de phases liquide-vapeur.

Les trois parties du problème sont pratiquement indépendantes, mais il est nécessaire de lire le début de la première partie sur la tension de surface pour aborder la suite.

Le candidat sera amené à prendre des initiatives à propos de quelques valeurs numériques de grandeurs physiques intervenant dans le problème.

Toutes les parties comportent des questions pédagogiques relatives à l'enseignement en collège ou en lycée. Les extraits correspondants du programme officiel sont donnés en annexe D.

Quelques rappels de thermodynamique

Si l'on considère un système homogène caractérisé par son volume V, son entropie S, son nombre de moles N, à la température T et à la pression P, l'enthalpie libre G se construit à partir de l'énergie interne $U(S, V, N)$ par la transformation suivante :

$$G = U - TS + PV$$

Les variables naturelles de l'enthalpie libre $G(T, P, N)$ sont la température T, la pression P et le nombre de moles N. La différentielle de G s'écrit :

$$dG = -SdT + VdP + \mu dN$$

où $\mu(T, P)$est le potentiel chimique molaire. Enfin, on rappelle que $G = \mu N$ et que $\left(\frac{\partial \mu}{\partial P}\right)_T = V_M$ où V_M est le volume molaire.

Valeurs numériques

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314\,\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$
Constante de Boltzmann : $k_B = 1,381 \times 10^{-23}\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$
Constante de Planck : $h = 6,626 \times 10^{-34}\,\mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}}$
Vitesse de la lumière dans le vide : $c_0 = 2,998 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Quelques données pour l'eau à l'équilibre liquide-vapeur, en fonction de la température : pression de vapeur saturante P_V, tension de surface γ, vitesse du son v.

T °C	P_V kPa	γ $\mathrm{mN \cdot m^{-1}}$	v $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$
20	2,34	72,8	1480
98	94,4	-	-
100	101	58,0	-
240	3350	28,4	-
320	11300	9,81	-

On prendra $\gamma = 70\,\mathrm{mN \cdot m^{-1}}$ pour l'interface eau-air à température ambiante.

Première partie - Tension de surface

1.1 Notion de tension de surface - Loi de Laplace

On apprend en général qu'un liquide adopte la forme du récipient qui le contient. Ce n'est pas tout à fait exact, en particulier pour les petits systèmes : une petite quantité de liquide se présente souvent comme une goutte sphérique. En effet, la surface d'un liquide est soumise à une tension superficielle, un peu comme une membrane élastique.

1. Le texte suivant propose une origine microscopique à cette tension superficielle.

> Un liquide est un état condensé : les molécules s'attirent. Lorsque cette attraction l'emporte sur l'agitation thermique, les molécules passent d'une phase gazeuse à une phase dense mais encore désordonnée : un liquide. Les molécules au sein du liquide bénéficient d'interactions attractives avec toutes leurs voisines et sont dans un état "heureux". Au contraire, à la surface du liquide, elles perdent la moitié de leurs interactions cohésives et sont "malheureuses". (tiré de *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, 2005)

   - Le texte ne précise pas l'état des molécules dans la phase gaz. A l'équilibre de phase, sont-elles "heureuses" ou "malheureuses" ?
   - La cohésion d'un liquide tel qu'une huile est due à des interactions de type van der Waals et l'énergie de cohésion par molécule est de l'ordre de $k_B T$. Donner l'ordre de grandeur d'une dimension moléculaire et en déduire, par analyse dimensionnelle, l'ordre de grandeur de l'énergie par unité de surface γ associée à l'existence d'une interface à température ambiante. Comparer à la valeur de γ pour l'eau. Commenter.

La tension de surface γ est définie mécaniquement de la manière suivante. Considérons l'interface entre deux fluides (fig. 1). Soit une surface (S) et un élément de longueur dl du contour de (S). Tout se passe comme si l'interface extérieure à (S) exerçait sur dl une force $d\vec{F}$ perpendiculaire à dl, dirigée vers l'extérieur de S et de norme $dF = \gamma dl$.

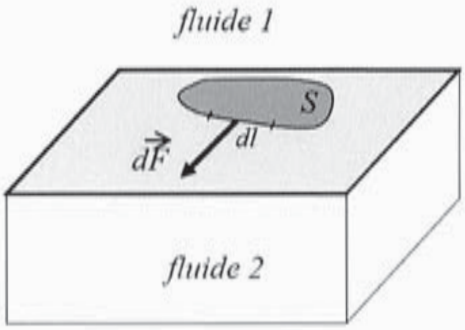


FIGURE 1 –

2. Calculer le travail de ces forces superficielles quand l'aire A de la surface (S) augmente de dA (par simplicité, on pourra se limiter à une surface (S) rectangulaire). Conclure quant à la cohérence de cette définition mécaniste de γ et l'approche énergétique de la question précédente.

On considère maintenant une surface (S) infinitésimale cylindrique, courbée dans une direction avec un rayon de courbure R. Sur la figure ne sont représentées que les forces s'exerçant sur les côtés non courbés. L'angle $d\theta$ est infinitésimal, même si cela n'apparaît pas sur la figure 2.

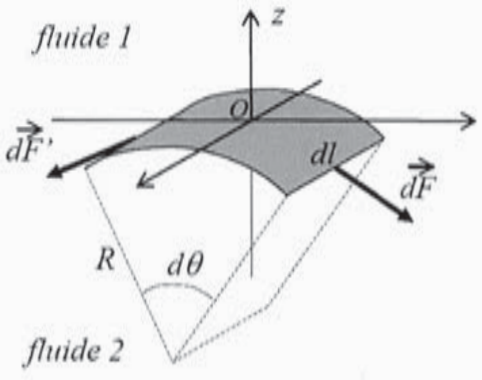


FIGURE 2 –

3. Calculer la projection sur l'axe Oz des forces capillaires s'exerçant sur (S).
4. Faire le bilan des forces s'exerçant sur (S). En déduire une relation entre γ, R et les pressions P_1 et P_2 des deux phases fluides.
5. Justifier que pour une interface sphérique :

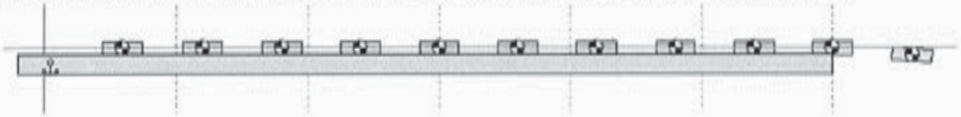
$$P_2 - P_1 = 2\,\frac{\gamma}{R} \qquad \text{(équation de Laplace).} \tag{1}$$

6. Quelle est la pression dans une goutte d'eau de rayon 1 mm environnée d'air à la pression atmosphérique ? Même question pour une bulle d'air dans l'eau liquide environnante à la pression atmosphérique. On rappelle que $\gamma = 70\,\mathrm{mN}\cdot\mathrm{m}^{-1}$ pour l'interface eau-air.
7. Une bulle de savon est constituée d'une double interface liquide-air. Pour chaque interface, $\gamma \approx 20\,\mathrm{mN.m}^{-1}$. Quelle est la pression dans une bulle de savon de rayon 1 cm ?

1.2 Questions liées à l'enseignement de la mécanique et de l'hydrostatique au lycée

8. Après avoir enseigné tous les contenus du programme correspondant à l'étude des mouvements en classe de seconde, un professeur a fait travailler ses élèves sur la notion de force en utilisant l'énoncé ci-dessous.

On s'intéresse au mouvement simulé d'un palet de hockey lancé sur une patinoire :



Ce mouvement peut être considéré comme rectiligne et uniforme (sur quelques mètres) :

Quelles sont les forces qui s'exercent sur le système palet qui permettent d'expliquer son mouvement simulé ? Quelles sont leurs caractéristiques ? Détaillez votre proposition et vos arguments.

Les réponses de trois élèves sont données en annexe A, ainsi que la présentation de ce qu'on appelle les diagrammes "objet-interaction".
- Analyser les erreurs des élèves, expliquer en quoi le diagramme "objet-interaction" est un outil qui peut permettre d'éviter certaines d'entre elles.
- Proposer une correction complète des questions posées.

9. Dans le but de vérifier si le principe fondamental de l'hydrostatique est solidement ancré chez ses élèves de terminale STI2D, un professeur leur propose les deux situations schématisées figure 3. Il a relevé ces deux exemples donnés dans un article de recherche en didactique comme étant révélateurs de représentations initiales erronées qui surgissent même après l'enseignement du concept de pression dans un fluide.

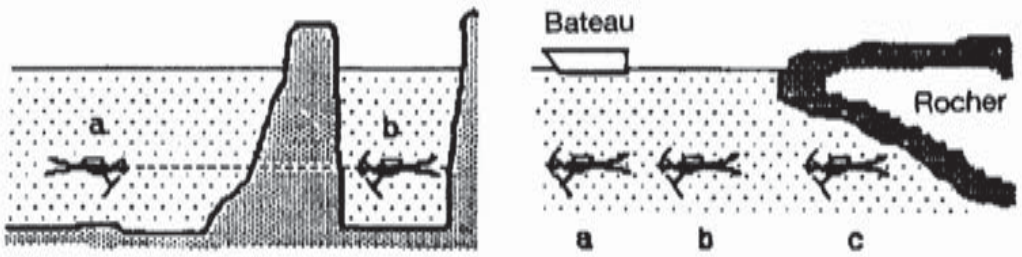


FIGURE 3 –

- Imaginer les questions qui pourraient accompagner ces deux schémas pour parvenir à vérifier si l'élève raisonne à partir du principe fondamental de l'hydrostatique ou bien plutôt d'un modèle personnel hérité du sens commun.
- Rédiger les réponses exactes attendues des élèves et, en vous appuyant sur votre expérience professionnelle, donner des exemples de réponses erronées fréquentes et la cause probable de ces erreurs.

1.3 Capillarité et gravité

1.3.1 Loi de Jurin

10. On considère un fluide de masse volumique ρ au repos dans un référentiel galiléen. Ce fluide se trouve dans un champ de pesanteur uniforme $\overrightarrow{g} = -g\overrightarrow{e}_z$ ($g > 0$ et l'axe Oz est suivant la verticale ascendante).

    Faire le bilan des forces s'exerçant sur un élément de volume $dxdydz$ centré sur un point M de coordonnées (x_M, y_M, z_M).

    En déduire que la pression P obéit à l'équation fondamentale de l'hydrostatique :

$$\overrightarrow{grad}P = \rho\overrightarrow{g}. \tag{2}$$

11. Démontrer alors que la surface libre d'un liquide à l'équilibre dans un récipient immobile est horizontale.

12. En réalité, près des bords du récipient, la surface libre est courbée et forme un ménisque (fig. 4). L'extension L_C de ce ménisque dépend de la compétition entre la pesanteur et les forces de tension superficielle.

    Quels sont les paramètres dont dépend L_C ?

    Par analyse dimensionnelle, déterminer la relation liant L_C à ces paramètres. Donner ensuite l'ordre de grandeur de L_C pour l'eau.

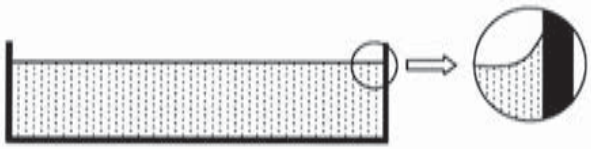


FIGURE 4 –

13. Les effets de tension superficielle sont encore plus manifestes si l'on enfonce un tube de petit rayon r dans de l'eau. Pour un tube en verre très propre, on observe la situation schématisée figure 5. On note H l'ascension capillaire dans le tube.

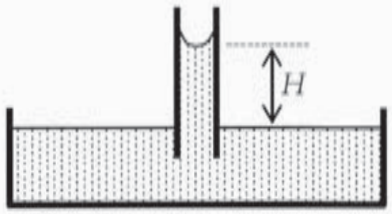


FIGURE 5 –

- A quelle condition sur r la forme du ménisque dans le tube est-elle hémisphérique ? On suppose cette condition réalisée par la suite.
- En raisonnant sur la valeur de la pression en différents points du fluide, démontrer la loi de Jurin, qui donne l'ascension H en fonction du rayon r :

$$H = \frac{2\gamma}{\rho g r} \tag{3}$$

- Application numérique : calculer H pour de l'eau dans un tube de rayon $r = 100\,\mu$m.

1.3.2 Pression de la sève montante dans les arbres

Dans les arbres, la circulation montante de la sève depuis les racines jusqu'aux feuilles se fait dans un réseau de vaisseaux dont le diamètre varie de la centaine à la dizaine de micromètres suivant la nature de l'arbre et la position du vaisseau. On suppose que la sève montante n'est composée que d'eau, et que l'eau au niveau du sol est à la pression atmosphérique P_{atm}.

14. D'après la loi de Jurin, jusqu'à quelle hauteur peut monter la sève ?

Le contact entre la sève et l'atmosphère se fait à la surface des feuilles, par des orifices (stomates) sur lesquels s'appuie le ménisque et dont le rayon r_S est plus petit que le rayon r des vaisseaux comme schématisé figure 6. On note R le rayon de courbure du ménisque.

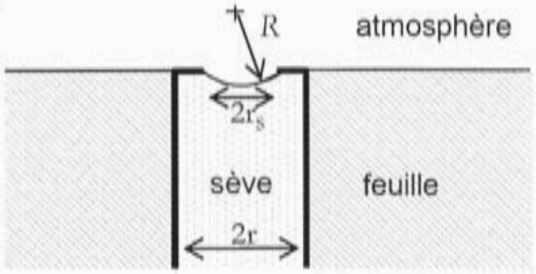


FIGURE 6 –

15. La pression atmosphérique P_{atm} restant constante, comment évolue le rayon de courbure R du ménisque si la pression de la sève au niveau de la feuille diminue progressivement ?
En déduire qu'il existe une valeur P_m de la pression de la sève dans les feuilles en dessous de laquelle le vaisseau est envahi par le gaz (embolie).
16. Exprimer P_m en fonction de r_S, P_{atm} et γ. Application numérique : $r_S = 20$ nm. Préciser le signe de P_m.
17. Pour fixer les idées, on considère un arbre de 20 m de hauteur.
On suppose que l'écoulement de sève dû à l'évaporation a un effet négligeable sur la pression. Calculer la pression P en fonction de l'altitude z. Les vaisseaux remplis de sève sont-ils stables vis à vis de l'embolie ?
18. La différence de pression $P(z) - P_{atm}$ a été mesurée pour les espèces *Schefflera* et *Thuya*. Les différentes branches du graphe (fig. 7) pour une même espèce correspondent aux différentes branches et rameaux où sont faites les mesures.

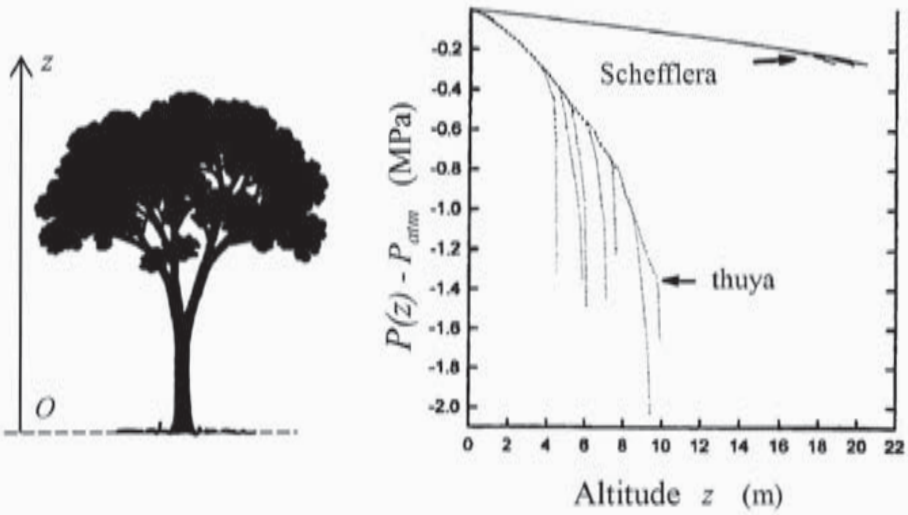


FIGURE 7 – adapté de M.T. Tyree *et al.*, Plant Physiology (1991).

Ces mesures sont-elles compatibles avec le résultat obtenu à la question précédente ? Quelle hypothèse vous semble-t-elle la plus discutable ?

19. Ces mesures montrent que la sève est souvent à une pression négative. En d'autres termes, il est possible de "tirer" sur de l'eau, comme sur une corde, sans que l'eau ne "casse". Pourquoi est-ce possible pour un liquide et non pour un gaz ?

Deuxième partie - Transition liquide-vapeur

2.1 Transitions de phase au collège et au lycée

20. *Diagramme de phase*

    Le programme officiel de la classe de cinquième cite parmi les connaissances à acquérir : "un palier de température apparaît lors du changement d'état d'un corps pur" (cf. Annexe D).
    - A quelle expérience cet énoncé fait-il référence ? Cet énoncé est-il complet ?
    - De quels paramètres peuvent dépendre les valeurs des paliers pour les transitions solide-liquide et liquide-vapeur ? Si ces paramètres varient (dans une gamme compatible avec un contexte scolaire !), pensez-vous que des écarts significatifs aux valeurs attendues peuvent être observés dans le cas de l'eau ?
    - Que répondre à un élève de cinquième qui remarque qu'à température ordinaire (20°C) et sous pression atmosphérique l'eau peut se trouver à l'état gazeux, tandis qu'il a appris que l'eau était liquide en dessous de 100°C ?
    - Proposer le schéma de principe d'une expérience qui permette d'observer un palier de *pression*.

21. *Chaleur latente*
    - Définir la chaleur latente de vaporisation.
    - La chaleur reçue par un système détermine-t-elle à elle seule l'état final du système dans le cas général ? Dans le cas particulier où le système subit une transition de phase ?

22. En annexe B est donné l'énoncé d'une séance de travaux pratiques proposé à des élèves de première S. Les résultats numériques d'un ou des élèves sont donnés à chaque question.

    (a) Proposer une correction détaillée aux questions de la partie **Exploitation individuelle** de ce TP à partir des résultats de l'élève.

    (b) Pour la partie **Analyse des résultats**, faire une analyse statistique à l'aide de votre calculatrice et répondre aux questions de cette partie en utilisant les notions d'incertitude, d'erreur aléatoire et d'erreur systématique. NB : *tous* les résultats à prendre en compte sont donnés dans le tableau de la question D.1.

    (c) Quelle(s) critique(s) pédagogique(s) ou quel(s) complément(s) apporteriez-vous à cet énoncé de TP ?

    (d) Que penser de la précision de la mesure effectuée dans ce TP ? Faire des propositions pour améliorer cette précision et l'exploitation des résultats.

    (e) Cette méthode vous semble-t-elle applicable à la détermination d'une "énergie" massique d'ébullition ?

2.2 Thermodynamique de la transition liquide-vapeur

On considère un système $\mathfrak{S}$ fermé, caractérisé par une entropie S, un volume V, une énergie interne U. $\mathfrak{S}$ est en contact avec un réservoir $\mathfrak{R}$ avec lequel il peut échanger du volume et de la chaleur. $\mathfrak{R}$ est supposé très grand, de sorte que sa température T_0 et sa pression P_0 sont constantes.

23. $\mathfrak{S}$ subit une transformation pendant laquelle V varie de ΔV, S de ΔS et U de ΔU. On définit le potentiel thermodynamique Φ par :

$$\Phi = U - T_0 S + P_0 V.$$

    Montrer que pour une transformation spontanée : $\Delta\Phi = \Delta U - T_0\Delta S + P_0\Delta V \leq 0$. On pourra raisonner par exemple sur l'ensemble isolé $\{\mathfrak{S} \cup \mathfrak{R}\}$.

24. On considère la transformation de $\mathfrak{S}$ schématisée figure 8. Dans son état initial, le système $\mathfrak{S}$ est homogène, composé de N_{tot} mole d'un corps pur en phase gaz à la pression P_0 et à la température T_0. Dans son état final, $\mathfrak{S}$ est composé de $N_{tot} - N$ moles de gaz (toujours à P_0 et à T_0) et d'une goutte de N moles de liquide de volume V_1, à la température T_0 et la pression P_1. On note V_0 le volume de gaz occupé initialement par les N moles ayant subi la transformation.

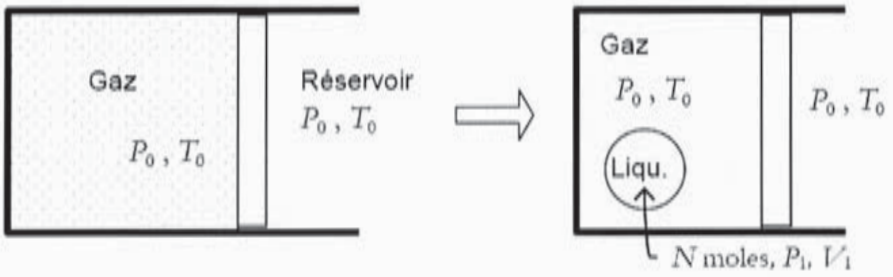


FIGURE 8 –

Montrer que $\Delta\Phi = G_L(T_0, P_1, N) - G_G(T_0, P_0, N) + (P_0 - P_1)V_1$, où G_L et G_G désignent les enthalpies libres des phases liquide et gaz.

A l'expression ci-dessus, on admettra qu'il faut ajouter une contribution due à la création d'interface, de sorte que :

$$\Delta\Phi = G_L(T_0, P_1, N) - G_G(T_0, P_0, N) + (P_0 - P_1)V_1 + \gamma A \tag{4}$$

Dans la suite de cette partie (à l'exception de la question 34), on suppose que le liquide est incompressible de volume molaire V_L et que le gaz est parfait. On note P_V la pression d'équilibre liquide-vapeur à la température T_0. Enfin, on fait l'hypothèse que toutes les pressions sont proches de P_V.

25. Montrer que le potentiel chimique $\mu_L(T_0, P_1)$ est donné par :
$$\mu_L(T_0, P_1) = \mu_L(T_0, P_V) + V_L(P_1 - P_V).$$
Montrer que le potentiel chimique $\mu_G(T_0, P_0)$ est donné par :
$$\mu_G(T_0, P_0) = \mu_G(T_0, P_V) + RT_0 \ln(P_0/P_V).$$

26. En déduire que :
$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{3} r^3 \left[(P_0 - P_V) - \frac{RT_0}{V_L} \ln(P_0/P_V) \right] + 4\pi r^2 \gamma \tag{5}$$
où r est le rayon de la goutte de liquide.

27. A quelle condition peut-on négliger $(P_0 - P_V)$ devant $(RT_0/V_L)\ln(P_0/P_V)$? On supposera cette condition réalisée dans la suite.

28. Représenter $\Delta\Phi$ en fonction de r dans les deux cas suivants : $P_0 > P_V$ et $P_0 < P_V$.
En déduire dans chaque cas quelle est la phase (liquide ou gaz) la plus stable. Ce résultat était-il prévisible ?

Dans la suite de cette partie sur la condensation, on s'intéresse uniquement au cas $P_0 > P_V$.

29. On note r_C le rayon critique pour lequel $\Delta\Phi(r)$ est maximal. Donner l'expression de r_C.

30. Initialement, $\mathfrak{S}$ n'est formé que de vapeur. Une petite fluctuation amène $\mathfrak{S}$ dans l'état { vapeur + goutte de liquide de rayon r}.
Discuter l'évolution ultérieure de $\mathfrak{S}$ suivant la valeur de r. Comment qualifie-t-on l'état initial du système ?

31. Donner l'expression de la barrière d'énergie E_b que doit franchir le système pour passer de l'état initial à l'état thermodynamiquement stable.

32. Par analogie avec le cas d'une réaction chimique dont la cinétique est limitée par une étape dont l'énergie d'activation est grande devant $k_B T$, proposer une expression pour la probabilité que le gaz se liquéfie entièrement (à un facteur multiplicatif près).

33. Des expériences menées sur le nonane à température constante T_0 ont permis de mesurer la probabilité de liquéfaction Pr à une constante multiplicative C^{te} près en fonction de la pression initiale P_0. Les résultats sont regroupés figure 9, où est représenté $\ln(Pr/C^{te})$ en fonction de $1/\left[\ln(P_0/P_V)\right]^2$.

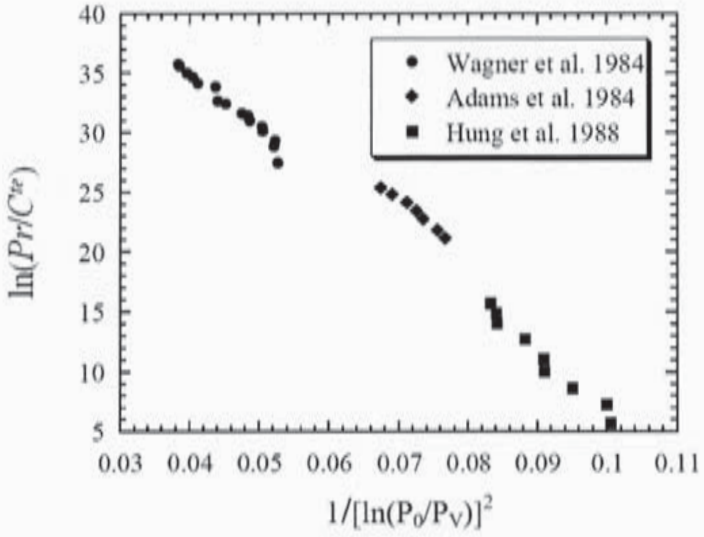


FIGURE 9 – adapté de J.L. Katz *et al.*, *Atmospheric Aerosols and Nucleation*, 1988

Discuter qualitativement et quantitativement ces données expérimentales à la lumière des calculs précédents. Pour le nonane à $T_0 = 238$ K : $V_L = 0,167 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3$, $P_V = 3\,\mathrm{mbar}$, $\gamma = 28\,\mathrm{mN \cdot m^{-1}}$.

34. Pour l'instant, on s'est intéressé exclusivement au cas de la condensation.

Le retard à la transition de phase peut-il s'observer dans le cas inverse de la nucléation d'une bulle de gaz (ou *cavitation*) dans du liquide sous tension ?

Donner un exemple de retard à une transition de phase qui ne soit pas la transition liquide-vapeur.

Troisième partie - L'eau métastable

3.1 Dualité onde-corpuscule en classe de terminale S

Le programme de terminale S demande aux élèves de maîtriser des connaissances sur les propriétés des ondes et la dualité onde-corpuscule (voir annexe D).

35. Placer sur une frise chronologique le nom d'au moins trois physiciens dont les travaux ont eu une importance cruciale pour édifier le concept de "dualité onde-corpuscule". Expliquer en quelques mots leur contribution et préciser la décennie de la publication de leurs travaux.
36. Juste après que l'enseignement de cette partie du programme a été mis en œuvre avec l'exemple du photon, un professeur souhaite bâtir une activité d'une heure environ, en s'appuyant sur les connaissances toutes récentes de ses élèves de terminale S et sur des documents numérotés donnés en annexe C. L'objectif visé, en faisant travailler les élèves en autonomie, serait de les amener à extraire des données et les exploiter, tout en les articulant pour rédiger une réponse à une question ouverte.
    Imaginer ce questionnement qui peut être proposé aux élèves en précisant quels documents seront utilisés et quelles données éventuelles pourraient être rajoutées.
    Les consignes données aux élèves doivent être précises et le corrigé des réponses attendues doit être fourni.

3.2 Diffusion Brillouin

L'interprétation précise des expériences de cavitation dans l'eau exige de connaître son équation d'état, y compris à des pressions négatives, dans son domaine de métastabilité. Cette équation d'état a été mesurée récemment par diffusion Brillouin (K. Davitt *et al.*, Journal of Chemical Physics, 2010).

37. On considère une onde acoustique de longueur d'onde λ se propageant dans l'eau avec la célérité v. Comme pour une onde électromagnétique, cette onde acoustique peut être décrite en terme de particules, qu'on appelle des phonons.
    Par analogie avec le photon, définir la quantité de mouvement $\overrightarrow{p}$ et l'énergie e d'un phonon. Calculer numériquement $\|\overrightarrow{p}\|$ et e pour une onde sonore de fréquence 1 kHz. Commenter.
38. Quelle est la longueur d'onde minimum en dessous de laquelle la notion d'onde acoustique n'a plus de sens ? En déduire l'ordre de grandeur de l'énergie maximum d'un phonon. Comparer avec l'énergie typique d'un photon dans le visible.

Le schéma de principe d'une expérience de diffusion Brillouin est donné figure 10. Un faisceau laser incident (longueur d'onde dans le vide λ_0, fréquence ν) éclaire une cuve cylindrique remplie de liquide. Les photons incidents subissent des collisions avec les phonons acoustiques correspondant aux fluctuations de densité du liquide. On détecte les photons diffusés, c'est à dire la lumière diffusée (fréquence ν_+) dans une direction faisant un angle ϕ avec la direction du faisceau incident.

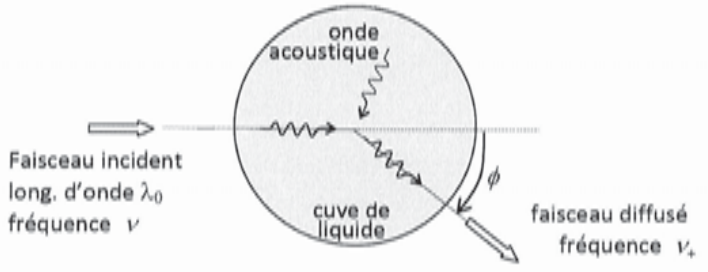


FIGURE 10 –

On considère une collision dans le liquide entre un photon incident, de quantité de mouvement $\overrightarrow{P}$ et un phonon de quantité de mouvement $\overrightarrow{p}$. Lors de cette collision, le phonon disparaît et le photon diffusé acquiert une quantité de mouvement $\overrightarrow{P_+}$.

39. Ecrire la conservation de l'énergie lors de la collision. Que peut-on dire de la variation relative de l'énergie du photon lors de cette collision ?

40. Que peut-on dire de la variation relative de la quantité de mouvement du photon ? Ecrire la conservation de la quantité de mouvement et en faire la représentation graphique. En déduire que $p \simeq 2P\sin(\phi/2)$.

41. On admettra que dans un milieu d'indice n, la quantité de mouvement du photon incident s'écrit : $P = \dfrac{nh}{\lambda_0}$.
En utilisant les résultats des questions précédentes, montrer que le décalage en fréquence dû à la diffusion Brillouin est donné par :

$$\nu_+ - \nu = \frac{2n}{\lambda_0} v \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \tag{6}$$

où ν_+ et ν sont les fréquences respectives des photons diffusés et incidents, et n l'indice de réfraction du liquide.

42. Pourquoi la diffusion Brillouin est-elle qualifiée d'inélastique ?
Quel est le décalage en fréquence $(\nu_- - \nu)$ s'il y a émission et non anihilation d'un phonon au cours de la collision ?

43. Calculer le décalage Brillouin $(\nu_+ - \nu)$ pour l'eau à pression et température ambiante pour $\lambda_0 = 532\,\text{nm}$ et pour $\phi = 90°$, puis le décalage correspondant en longueur d'onde (l'indice de l'eau est 1,33). La mise en évidence de la diffusion Brillouin vous paraît-elle possible avec un spectromètre à réseau ?

3.3 Principe d'un interféromètre de Perot-Fabry

Pour analyser le décalage Brillouin en fréquence, on utilise en pratique un interféromètre de Perot-Fabry schématisé figure 11. Celui-ci est constitué de deux miroirs plans parallèles, semi-réfléchissants, de coefficient de réflexion élevé. On note e la distance entre les deux miroirs, qui est de l'ordre du centimètre. On assimilera l'air à un milieu d'indice 1.

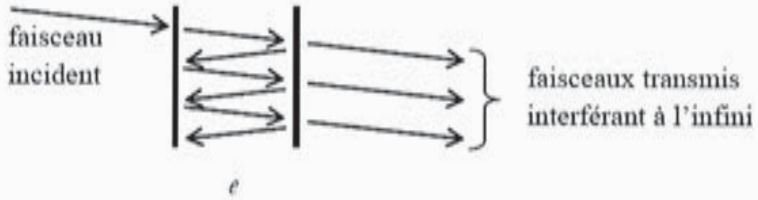


FIGURE 11 – Schéma d'un interféromètre de Perot-Fabry. Par commodité, les faisceaux sont représentés inclinés par rapport à la normale aux miroirs, mais ils sont en réalité perpendiculaires aux miroirs.

On suppose tout d'abord que le faisceau incident est parfaitement monochromatique de fréquence ν.

44. Calculer la différence de phase entre deux rayons sortants successifs. Quel est l'ordre de grandeur de l'ordre d'interférence ?

Pour obtenir un spectre avec un Perot-Fabry, on fait varier e sur une distance de l'ordre du micromètre et on mesure l'intensité transmise I_t en fonction de e.

45. Pour quelles valeurs de e l'intensité transmise I_t est-elle maximale ?
On admettra que, dès que e ne coïncide pas avec ces valeurs, $I_t(e)$ est très faible. Representer très schématiquement $I_t(e)$ en fonction de e.

On note e_0 la distance pour laquelle l'ordre d'interférence pour la fréquence ν est p, et $e_0 + \Delta e$ la distance pour laquelle l'ordre d'interférence est $p+1$ (avec p entier).
Le faisceau incident est maintenant composé de deux raies de fréquences ν et $\nu' = \nu - \delta\nu$ ($\delta\nu > 0$). Les deux raies sont *très* proches. On note $e_0 + \delta e$ l'épaisseur pour laquelle l'ordre d'interférence est p pour la fréquence ν'.

46. On suppose que $\delta e < \Delta e$. Représenter I_t en fonction de e pour $e_0 - \Delta e < e < e_0 + \Delta e$ en précisant pour chaque maximum la fréquence et l'ordre correspondant.

47. Montrer que :

$$\frac{\delta e}{\Delta e} = \frac{\delta \nu}{ISL} \tag{7}$$

où $ISL = \dfrac{c}{2e_0}$ est ce qu'on appelle l'Intervalle Spectral Libre de l'interféromètre.

48. Que se passe-t-il si $|\delta\nu| > ISL$? Conclure quant à l'utilisation d'un interféromètre de Perot-Fabry.

3.4 Spectroscopie Brillouin

On se place dans les conditions expérimentales de la question 43. Le faisceau diffusé contient les raies de diffusion Brillouin ν_+ et ν_-, mais il contient aussi la raie à la fréquence initiale ν à cause de la diffusion Rayleigh qui résulte d'une diffusion élastique.

49. On utilise un Perot-Fabry dont l'ISL vaut 20 GHz. On fait l'expérience à pression et température ambiante. Représenter l'allure de $I_t(e)$ obtenue en sortie de l'interféromètre en précisant pour chaque maximum la fréquence (ν, ν_+ ou ν_-) et l'ordre d'interférence (...$p-1$, p, $p+1$, $p+2$...).

50. Pour des raisons pratiques, on utilise un Perot-Fabry d'ISL 4 GHz. Représenter à nouveau l'allure de $I_t(e)$ avec les mêmes consignes.

51. La figure 12 représente deux spectres expérimentaux obtenus avec un Perot-Fabry d'$ISL = 4$ GHz. Le spectre en trait continu est obtenu à pression et température ambiantes. Le second ($\circ$, légèrement décalé) est obtenu pour $P = -26$ MPa et à la même température.
    - Pour chaque raie, indiquer la fréquence (ν, ν_+ ou ν_-) et l'ordre d'interférence (...$p-1$, p, $p+1$, $p+2$...). On utilisera à cet effet le spectre donné en annexe E et **on rendra ce graphe avec la copie**.
    - Vérifier que les positions des raies Brillouin à pression ambiante sont cohérentes avec la valeur obtenue à la question 43.
    - Estimer la variation de vitesse du son quand la pression P passe de 0,1 à -26 MPa.

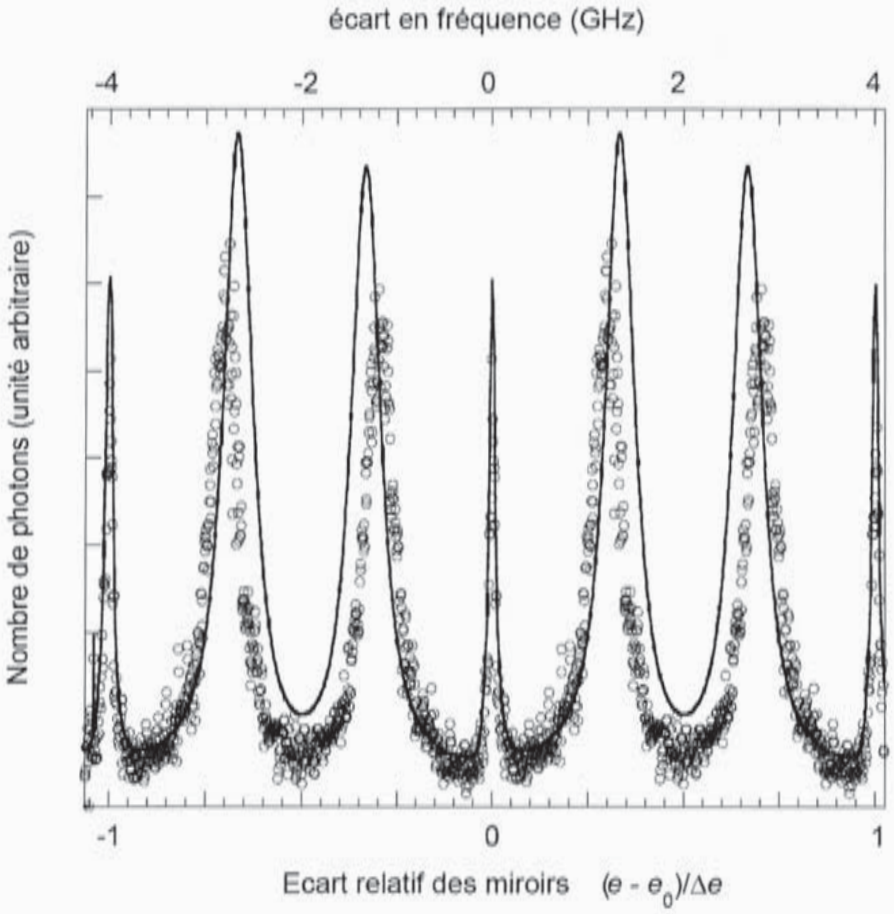


FIGURE 12 –

3.5 Equation d'état de l'eau

En plus de la vitesse du son v obtenue par diffusion Brillouin, on mesure également la masse volumique ρ à la température fixée $T = 23,3°C$. A cette température et sous pression atmosphérique (0,101 MPa), la masse volumique de l'eau vaut $\rho = 997,5\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ et la vitesse du son $v_0 = 1493,5\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

On rappelle que la vitesse du son est donnée par : $v = \dfrac{1}{\sqrt{\rho \chi_S}}$, avec $\chi_S = -\dfrac{1}{V}\left(\dfrac{\partial V}{\partial P}\right)_S$. Enfin, on admettra que, dans la gamme de paramètres considérée, la compressiblité isentropique peut être confondue avec la compressibilité isotherme.

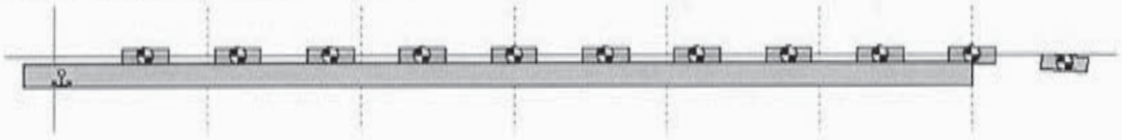
52. Pour les pressions positives et à $T = 23,3°C$, on trouve que v varie linéairement avec ρ : $k = \left.\dfrac{\partial v}{\partial \rho}\right|_T = 3,558\,\mathrm{m^4 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}}$. Sans mener à bien le calcul, expliquer comment on peut obtenir l'équation d'état $P(\rho)$ à $T = 23,3°C$.

53. En supposant que les relations de la question précédente peuvent être extrapolées à pression négative, calculer numériquement la valeur de la vitesse du son pour $\rho = 985,2\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

54. La mesure directe de v à $\rho = 985,2\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ donne : $v = 1449,9\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Que pensez-vous de la validité de l'équation d'état évoquée à la question 52 ?

ANNEXE A : Notion de force en seconde

On s'intéresse au mouvement simulé d'un palet de hockey lancé sur une patinoire :



Ce mouvement peut être considéré comme rectiligne et uniforme (sur quelques mètres) :

Quelles sont les forces qui s'exercent sur le système palet qui permettent d'expliquer son mouvement simulé ? Quelles sont leurs caractéristiques ? Détaillez votre proposition et vos arguments.

Une proposition élève 1 :

* Son poids $\vec{P}$ exercé par la Terre.
* La vitesse initiale exercé par la crosse
* l'air
* La glace.

Une proposition élève 2 :

force gravitationnelle : sur le palet
force de frottement: ~~sur la patinoire~~ aucune
force d'accélération : durant la descente
force de contact : aucune
Les forces sont nulles lorsque le palet est sur la glace et lorsqu'il la quitte la force du palet est plus forte et donc il tombe.

Une proposition élève 3 :

- force de réaction } se compense et empêche le palet de tomber } sur la patinoire
- force de gravitation }
- force de vitesse
- Ø force de frottement et de déplacement d'air.

Un outil proposé par la recherche en didactique de la physique : les diagrammes «objet-interactions»

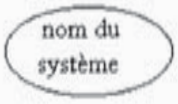
On appelle système ,un objet (matériel), une partie d'objet ou un ensemble d'objets (ce découpage de la réalité en systèmes est un choix fait par celui qui étudie la situation).

Interactions : quand un système A agit sur un système B, **simultanément** B agit sur A ; on dit que A et B sont en interaction. L'action de A sur B est notée A/B et l'action de B sur A est notée B/A.

Cet énoncé est applicable dans toutes les situations, c'est-à-dire quand les systèmes sont au repos et aussi quand ils sont en mouvement.

Représentation

Représentation d'un système



Représentation d'une interaction "de contact"

Représentation d'une interaction "à distance"

Une fois un système choisi, on représente toutes ses interactions avec les autres systèmes extérieurs sur le même schéma. Ce schéma global s'appelle le diagramme *système*-interaction ou encore « objet-interaction ».
Une fois le diagramme construit , on peut modéliser chaque action de A sur X ***par un vecteur représentant la force exercée par A sur X*** et réaliser le « bilan des forces « qui s'exerce sur le système.

D'après les travaux de recherche du groupe sésames :

http://pegase.ens-lyon.fr/theme.php?rubrique=1&id_theme=1

ANNEXE B : Texte d'une séance de Travaux Pratiques proposé en 1ère S

Quelle est l'énergie à fournir pour faire fondre la glace ?

Objectifs :

1. Comprendre que le changement d'état solide → liquide nécessite un apport d'énergie
2. Mesurer cette énergie de changement d'état

A. Principe

En été, il est courant d'utiliser des glaçons pour préparer une boisson fraîche. Au fur et à mesure que les glaçons fondent, la boisson refroidit. L'énergie perdue par la boisson est reçue par l'eau des glaçons, qui subit non pas une variation de température mais un changement d'état.

Pour déterminer la valeur de l'énergie nécessaire à faire fondre de la glace, le mélange eau liquide et eau solide est placé dans un calorimètre, récipient permettant de limiter les transferts thermiques vers l'extérieur. De cette façon, on peut considérer que l'énergie "perdue" par l'eau est égale à l'énergie "reçue" par la glace.

B. Protocole expérimental

1. Prélever une masse m_i de l'ordre de 200 g d'eau distillée à température ambiante.
   $m_i = 206\ g$
2. Placer cette eau dans le calorimètre avec le couvercle et le thermomètre. Attendre que la température se stabilise. Noter la valeur T_i de la température initiale de l'eau dans le calorimètre.
   $T_i = 20°C$
3. Prélever 4 ou 5 glaçons dans le bécher contenant les glaçons et de l'eau distillée. Essuyer ces glaçon sur du papier absorbant, déterminer rapidement leur masse m_g, puis les introduire, toujours rapidement dans le calorimètre.
   $m_g = 36\ g$
4. Agiter manuellement et doucement de temps en temps. Observer l'évolution de la température de l'eau dans le calorimètre. Faire une mesure de température toutes les minutes pendant 10 minutes.

t (en mn)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T (en $°C$)	19,5	13	9,5	6,5	6,5	7	7	7	7,5	7,5	7,5

   Noter la valeur T_{min}, température la plus basse atteinte.
   $T_{min} = 6{,}5°C$

C. Exploitation individuelle.

1. Pourquoi place-t-on les glaçons dans un bécher contenant de l'eau distillée ?
2. Calculer la valeur de l'énergie cédée par la masse m_i d'eau initialement présente dans le calorimètre, entre le début de l'expérience et l'instant où la température du mélange prend la valeur T_{min}.
   Données : capacité thermique massique de l'eau liquide c = 4,18 $J.g^{-1}.K^{-1}$.
3. En supposant que les transferts thermiques entre l'extérieur et le calorimètre sont négligeables, estimer la valeur de l'énergie reçue par les glaçons entre l'instant où on les place dans le calorimètre et l'instant où la température du mélange atteint T_{min}.

Tournez la page S.V.P.

4. Quelle masse m_2 d'eau a été formée par la fonte des glaçons ? En déduire la valeur de l'énergie nécessaire pour échauffer cette eau de fonte de 0°C à T_{min}.
5. Utiliser les résultats des questions 2 et 4 pour calculer la valeur de l'énergie utilisée pour réaliser le changement d'état des glaçons.
6. En déduire la valeur de l'énergie massique Δh_f de fusion de la glace, qui est l'énergie nécessaire pour faire fondre un gramme de glace, et donc exprimée en $J.g^{-1}$.

D. Analyse des résultats

1. Compléter le tableau suivant, afin de noter les résultats obtenus par tous les groupes de la classe.

groupe	1	2	3	4	5	6	7	8
Δh_f ($J.g^{-1}$)	296	302	303	273	289	300	312	301

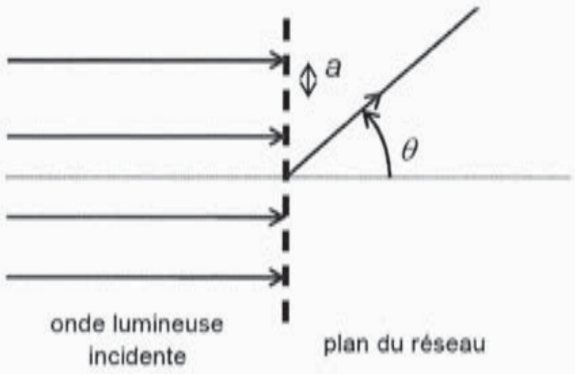
2. Comparer les valeurs obtenues par les différents groupes. Comment expliquer les écarts entre les résultats des différents groupes ?
3. D'après les résultats obtenus par les différents groupes, quelle valeur semble devoir être retenue pour l'énergie massique de fusion de la glace ?
4. La valeur de l'énergie massique de fusion de la glace dans des recueils de données est $3{,}3.10^2$ $J.g^{-1}$. Comparer cette valeur à celle obtenue expérimentalement.

Document 1 : les réseaux plans

Un réseau plan par transmission est constitué d'un grand nombre de fentes parallèles entre elles et équidistantes. La distance entre deux fentes consécutives (pas du réseau) est notée *a*.

Pour une onde lumineuse monochromatique incidente arrivant perpendiculairement au plan du réseau, on observe un pic d'intensité dans la direction θ chaque fois que celui-ci vérifie la relation : $\sin\theta = p\frac{\lambda}{a}$, avec p un entier (l'ordre d'interférence du pic de lumière observé) et λ la longueur d'onde de l'onde lumineuse.

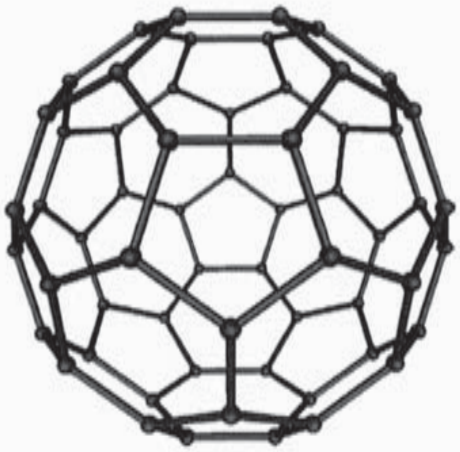
Cette relation est la traduction d'une condition d'interférence constructive en un point situé à grande distance du réseau.



Document 2 : Molécule de fullerène C60

Masse m = $1{,}2.10^{-24}$ kg

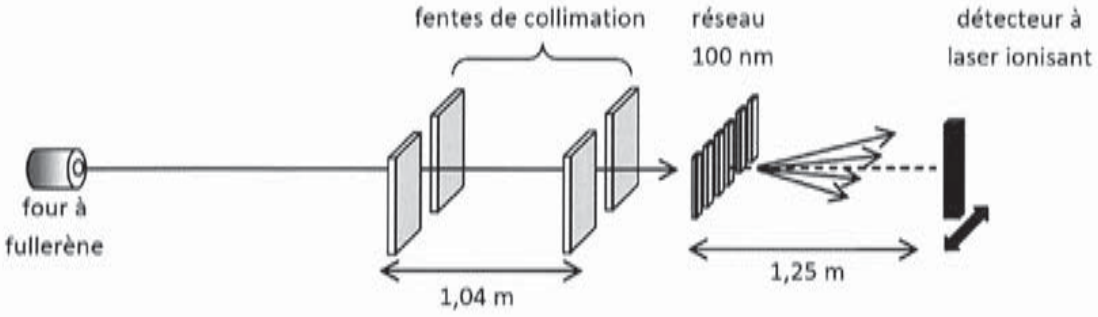
Diamètre moyen de la molécule : 1000 pm.



Tournez la page S.V.P.

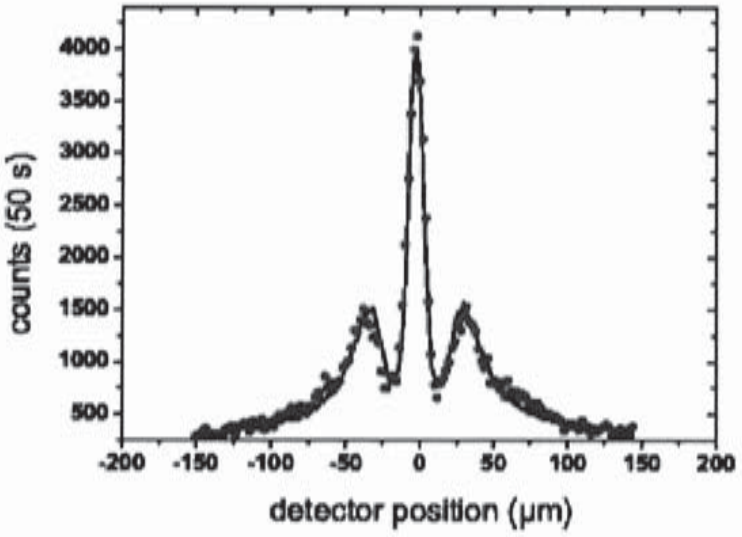
Document 3 : **Expérience d'interférences avec des molécules de fullerène C60 (d'après O. Nairz *et al*, Am. J. Phys.71, p. 319, 2003)**

Dispositif expérimental. Il est constitué d'une source qui contient un gaz constitué de molécules de fullerène C_{60} à une température de l'ordre de 900 K, ce qui correspond à une vitesse moyenne v_m de 200 m/s avec une largeur relative de $\Delta v/v_m = 60$ %.



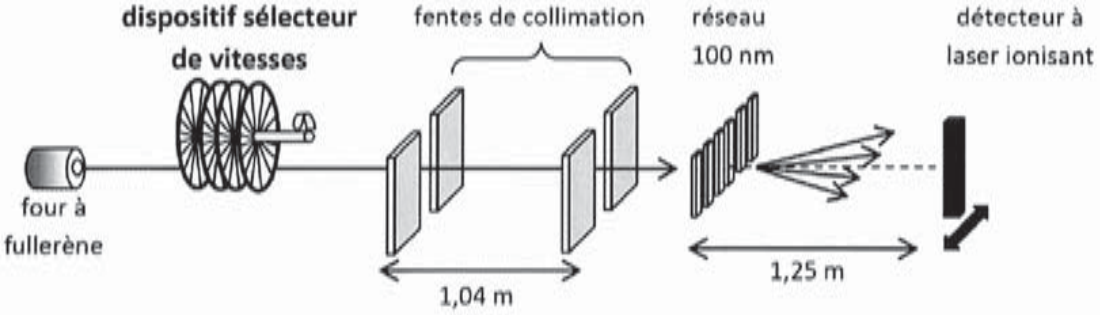
Après collimation, le jet est diffracté par un réseau de pas égal à 100 nm, la largeur d'une fente est de l'ordre de 55 nm. L'observation est réalisée dans un plan situé à une distance $L = 1{,}25$ m, le détecteur utilise un laser à argon qui ionise les molécules. La résolution spatiale du détecteur est de l'ordre de 8 µm ce qui est suffisant pour observer la figure d'interférence.

Résultats. La figure ci-dessous montre la figure d'interférence observée. Elle fixe également les échelles de distances. Les molécules sont identifiées par des impacts individuels et la figure d'interférence se construit, pas à pas, au fur et à mesure de l'accumulation des données.



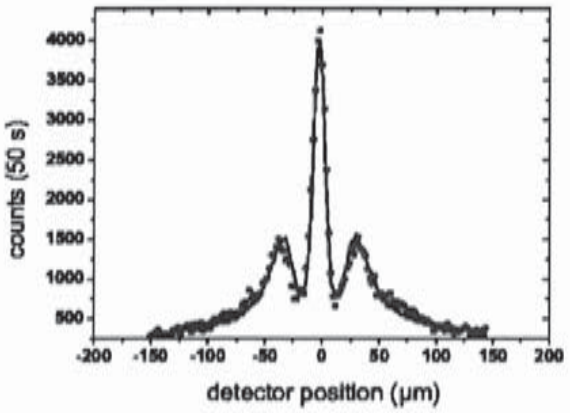
Document 4 : **Expérience d'interférences avec des molécules de fullerène C60 – sélection des vitesses (d'après O. Nairz *et al*, Am. J. Phys.71, p. 319, 2003)**

Dispositif expérimental. Il est identique à celui décrit dans le document 3, à ceci près qu'un sélecteur de vitesse a été interposé à la sortie du four. La vitesse moyenne est alors égale à v_m = 117 m/s avec une largeur relative $\Delta v/v_m$ = 17 %.

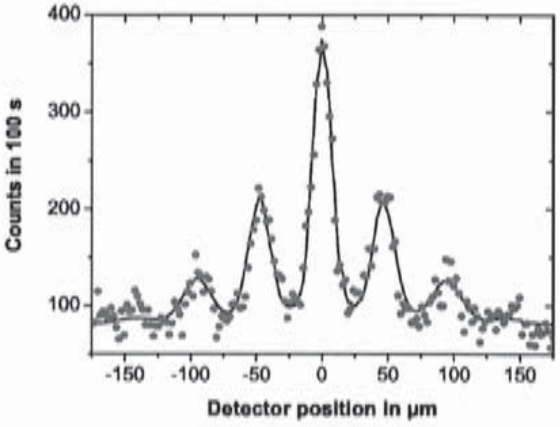


Résultats. Les figures ci-dessous montrent l'allure des figures d'interférence observées.

Sans sélecteur de vitesse



Avec sélecteur de vitesse



Tournez la page S.V.P.

Annexe D : extraits des programmes

Classes de cinquième (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008)

Connaissances	Capacités
LES CHANGEMENTS D'ÉTAT DE L'EAU : que se passe-t-il quand on chauffe ou refroidit de l'eau (sous pression normale) ?	
Les trois états physiques de l'eau	
Propriétés spécifiques de chaque état physique de l'eau : - forme propre de l'eau solide (glace) ; - absence de forme propre de l'eau liquide ; - horizontalité de la surface libre de l'eau liquide ; - compressibilité et expansibilité de la vapeur d'eau qui occupe tout le volume offert.	Observer et recenser des informations relatives à la météorologie et à la climatologie. Identifier et décrire un état physique à partir de ses propriétés. Respecter sur un schéma les propriétés liées aux états de la matière.
Les changements d'état	
Cycle de l.eau.	
Solidification, fusion, liquéfaction, vaporisation.	Réaliser, observer, schématiser des expériences de changements d'état.
Lors des changements d'état, la masse se conserve et le volume varie.	Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence ces phénomènes.
Un palier de température apparaît lors du changement d'état d'un corps pur.	Construire le graphique correspondant en appliquant des consignes. Contrôler, exploiter les résultats.
L'augmentation de la température d'un corps pur nécessite un apport d'énergie. Les changements d'état d'un corps pur mettent en jeu des transferts d'énergie. Températures de changements d'état de l'eau sous pression normale.	

Classes de seconde générale (Bulletin officiel spécial n° 4 du 29 avril 2010)

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
L'étude du mouvement : l'observation, l'analyse de mouvements et le chronométrage constituent une aide à l'activité sportive. Des lois de la physique permettent d'appréhender la nature des mouvements effectués dans ce cadre.	
Actions mécaniques, modélisation par une force. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps : modification de la vitesse, modification de la trajectoire. Rôle de la masse du corps. Principe d'inertie.	Savoir qu'une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de sa vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps. Utiliser le principe d'inertie pour interpréter des mouvements simples en termes de forces. *Réaliser et exploiter des enregistrements vidéo pour analyser des mouvements.*

Classes de Première S (Bulletin officiel spécial n° 4 du 30 novembre 2010)

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
Formes et principe de conservation de l'énergie	
Energie d'un point matériel en mouvement dans le champ de pesanteur uniforme : énergie cinétique, énergie potentielle de pesanteur, conservation ou non conservation de l'énergie mécanique. Frottements ; transferts thermiques ; dissipation d'énergie.	Connaître et utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un solide en translation et de l'énergie potentielle de pesanteur d'un solide au voisinage de la Terre *Réaliser et exploiter un enregistrement pour étudier l'évolution de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et de l'énergie mécanique d'un système au cours du mouvement.*
Formes d'énergie.	Connaître diverses formes d'énergie.
Principe de la conservation d'énergie. Application à la découverte du neutrino dans la désintégration β.	Exploiter le principe de conservation de l'énergie dans des situations mettant en jeu différentes formes d'énergie.

Physique-chimie en terminale STI2D-STL (Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011)

NOTIONS ET CONTENUS	CAPACITES EXIGIBLES
Les fluides dans l'habitat	
Pression dans un fluide parfait et incompressible en équilibre : pressions absolue, relative et différentielle.	Mesurer des pressions (absolue et relative).
Equilibre d'un fluide soumis à la pesanteur.	Citer et exploiter la principe fodamental de l'hydrostatique.
Ecoulement stationnaire.	Expliciter la notion de vitesse moyenne d'écoulement dans une canalisation.
Débit volumique et massique	Mesurer un débit.
	Citer et expliquer la loi de conservation de la masse

Tournez la page S.V.P.

Physique-chimie en enseignement spécifique de TS (Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011)

NOTIONS ET CONTENUS	*Compétences exigibles*
Propriétés des ondes Diffraction. Influence relative de la taille de l'ouverture ou de l'obstacle et de la longueur d'onde sur le phénomène de diffraction.	Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture ou de l'obstacle. Connaître et exploiter la relation $\theta = \lambda/a$. Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction. *Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.*
Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche.	Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.
Interférences.	*Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses.*
Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche. Couleurs interférentielles.	*Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.* Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses.
Effet Doppler.	Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.
Dualité onde-particule Photon et onde lumineuse.	*Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.*
Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.	*Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule.* *Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$.* *Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.*
Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière.	*Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.*

Modèle ENSD ©NEOPTEC

Nom :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)

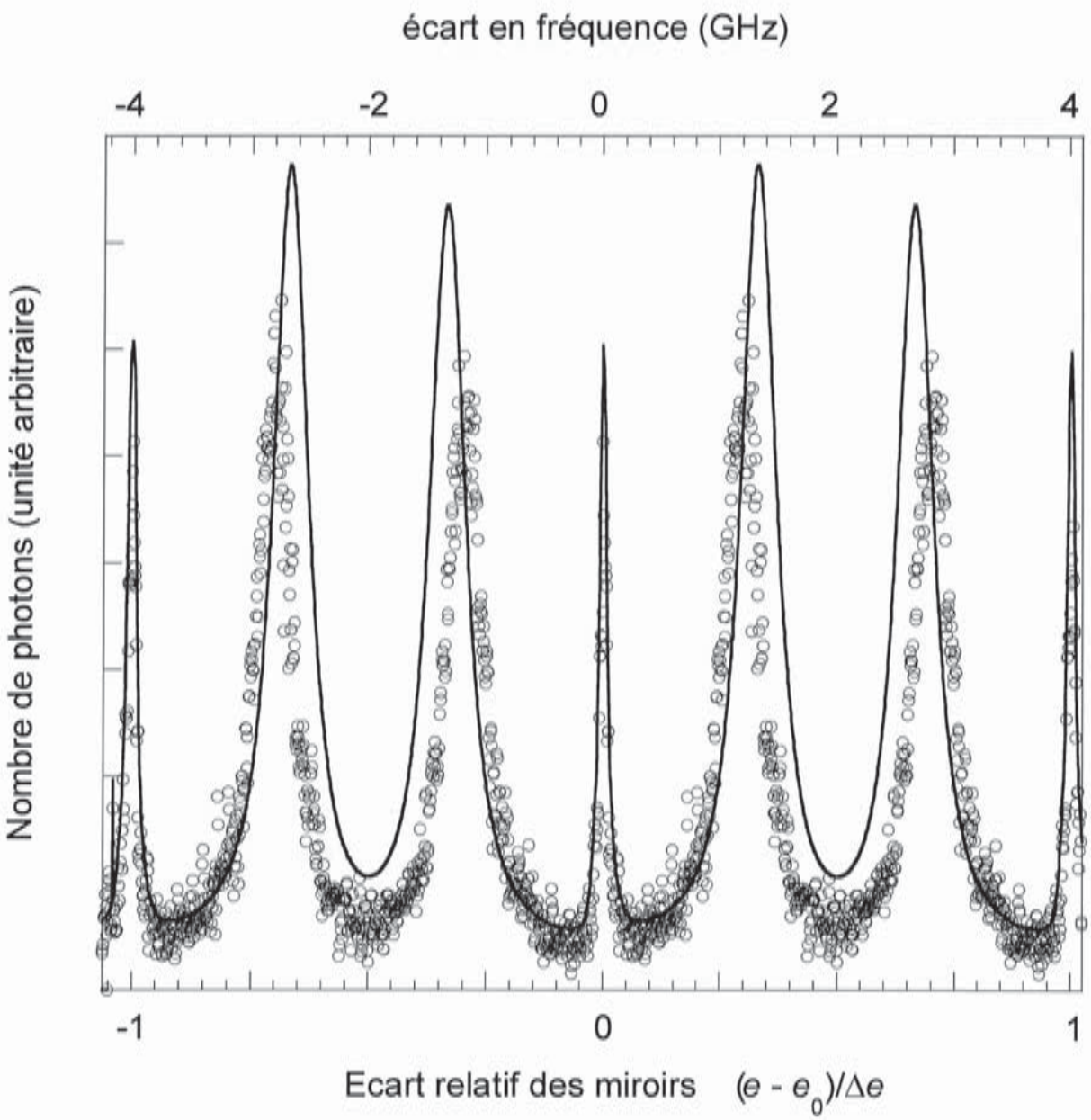
Prénom :

N° d'inscription :

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

Né(e) le : / /

Concours	Section/Option	Epreuve	Matière

Annexe E

Annexe E : à rendre avec la copie