

# Épreuve de Physique-Chimie - 27 Mai 2025

Durée : 4h

Consignes :

- L'usage de la calculatrice est interdit.
- Un résultat d'application numérique **ne doit pas** contenir d'opérations ou de fonctions (fraction, racine, logarithme, etc.) et **sera compté comme faux** s'il en contient.
- Les expressions littérales seront encadrées, et les applications numériques soulignées. **Une application numérique sans unité sera considérée fautive.**
- Les quatre parties sont indépendantes.
- Si vous constatez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, indiquez-le sur votre copie. Vérifiez tout de même que l'erreur ne provient pas de vous (homogénéité, ordre de grandeur, etc.).

## 1 Soulever un voilier par une grue (extrait du concours INP TSI 2022)

Pour mettre à l'eau un voilier ou déplacer un bateau, la plupart des clubs nautiques louent des camions grues. Pour cette étude, le voilier a les caractéristiques suivantes :

- longueur 12 m ;
- largeur 3,2 m ;
- masse  $m = 3,5 \cdot 10^3$  kg.

La grue utilisée a les caractéristiques utiles suivantes pour la partie levage :

- masse du crochet :  $m_c = 5,0 \cdot 10^2$  kg ;
- treuil équipé d'une boîte de vitesse à engrenages planétaires ;
- vitesse d'enroulement maximale du câble :  $v_{\max} = 1,2 \cdot 10^2$  m.min<sup>-1</sup> ;
- tension maximale du câble :  $T_{\max} = 56$  kN ;
- longueur de la flèche<sup>1</sup> déployée : 50 m ;
- capacité de levage maximale retenue : 70 tonnes ;
- treuil : diamètre  $D$  du cylindre en une couche de câble : 500 mm , couple de sortie dynamique 23 kN.m (le couple dynamique correspond au couple maximum que le treuil peut supporter) ;
- poulie en haut de flèche : diamètre  $d_p = 0,50$  m ;

Le crochet étant une partie de la charge, sa masse doit être prise en compte lors des calculs. L'intensité du champ de pesanteur sera prise égale à  $g = 10$  m.s<sup>-2</sup>.

### 1.1 Calcul de la tension du câble à l'équilibre et en phase de levage

Pour calculer la tension du câble, on suppose que le bateau est suspendu uniformément sur deux élingues, donc que la charge est répartie équitablement sur les élingues. (L'élingue est un élément souple, de masse négligeable, permettant d'attacher le bateau au crochet).

On supposera que la liaison est parfaite entre les élingues et le crochet. Le câble est inextensible.

---

1. La flèche est l'élément qui permet à l'engin de levage d'avoir une portée et une hauteur suffisantes pour déplacer des charges à des endroits précis. Elle peut tourner autour d'un axe vertical.

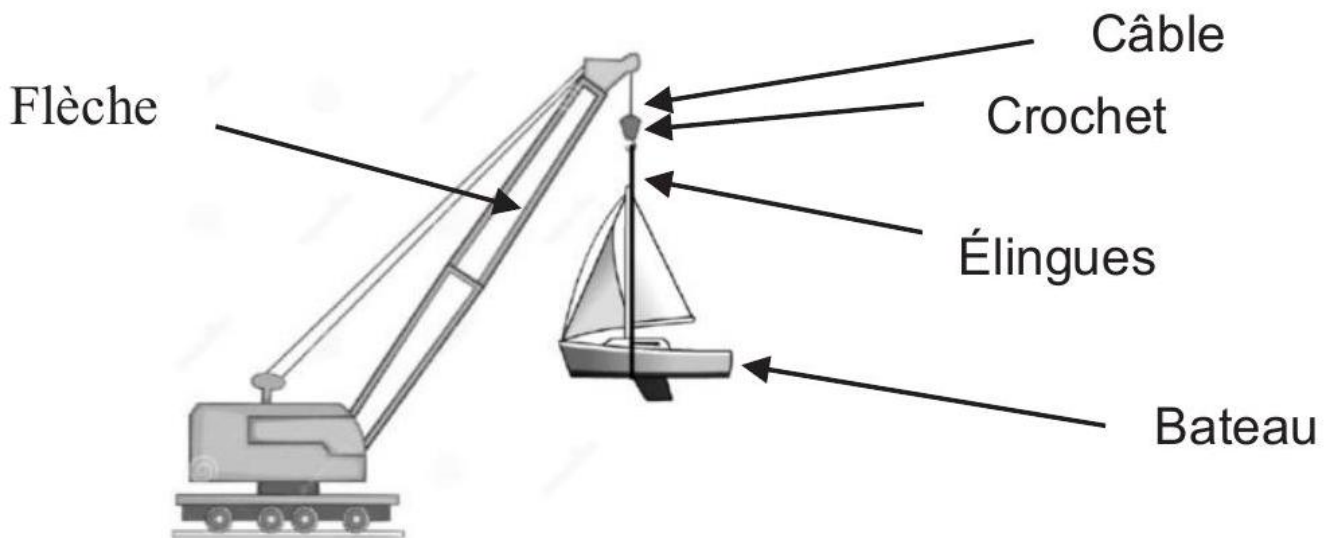


FIGURE 1 – Schématisation de la charge en haut de la flèche de grue.

1. Reproduire sommairement le schéma de la figure 1 en y faisant apparaître les forces exercées sur le crochet et calculer la tension  $T$  du câble lorsque la charge est à l'équilibre. Commenter.

On veut maintenant déterminer la tension  $T'$  du câble en phase de levage accéléré. On suppose qu'on lève verticalement le bateau, initialement immobile, d'une hauteur  $H = 10$  m sur une durée  $t_1 = 1,0$  min, l'accélération du bateau, notée  $a$ , étant constante.

2. Exprimer la vitesse instantanée  $v$  du bateau en fonction de  $a$  et du temps  $t$ .
3. Exprimer la hauteur d'élévation  $h$  en fonction de  $a$  et du temps  $t$ .
4. En déduire l'expression de la vitesse instantanée  $v$  en fonction de  $h$  et du temps  $t$ .
5. Calculer ainsi la vitesse finale  $v_f$  en m/min, vitesse atteinte à la fin de cette phase de levage de 10 m. Commenter.
6. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer l'expression de la tension  $T'$  du câble en fonction de  $v_f, H, g, m$  et  $m_c$ .
7. Montrer ainsi que  $T'$  est numériquement peu différente de  $T$ .

En utilisant les caractéristiques de la grue :

8. Déterminer, en fonction de  $T_{\max}$  (tension maximale du câble),  $m$  et de  $g$ , l'expression littérale de  $a_{\max}$ , accélération maximale supposée constante, pour ne pas dépasser cette tension maximale ;
9. Calculer la valeur de  $a_{\max}$  ;
10. Calculer la vitesse  $v_{th, \max}$  atteinte lors de cette élévation de hauteur  $H = 10$  m avec l'accélération déterminée précédemment ;
11. Comparer cette vitesse  $v_{th, \max}$  avec la vitesse  $v_f$  calculée à la question 5 et celle donnée par le constructeur. Commenter.

## 1.2 Puissance et couple du treuil nécessaires pour soulever le bateau

Pour soulever le bateau, le treuil de la grue doit avoir une puissance suffisante. Nous allons déterminer la puissance du treuil et la comparer à la puissance nécessaire.

Pour simplifier l'étude, nous n'allons considérer qu'une seule poulie en haut de flèche, permettant de modifier uniquement la direction du câble.

Un treuil est un dispositif mécanique permettant de commander l'enroulement et le déroulement d'un câble, d'une chaîne ou de tout autre type de filin destiné à porter ou à tracter une charge.

On formule l'hypothèse que le treuil permet d'enrouler le câble autour d'un cylindre sur une seule épaisseur, ce qui nous donne un diamètre  $D$  d'enroulement constant.

12. À partir des caractéristiques de la grue, exprimer en fonction de  $T_{\max}$  et de  $v_{\max}$  la puissance  $P_{\max}$  que peut développer le treuil pour la tension maximale  $T_{\max}$  du câble si celui-ci est enroulé à la vitesse  $v_{\max}$ . Calculer alors  $P_{\max}$ .

13. Exprimer le couple maximal  $C_{\max}$  développé par le treuil en fonction de  $P_{\max}$ ,  $v_{\max}$  et de  $D$ . Calculer alors  $C_{\max}$ .

Pour maintenir la charge en équilibre, le treuil doit fournir un couple appelé couple de maintien,  $C_m$ . On considère que la poulie est parfaite et que le câble est inextensible.

14. Exprimer  $C_m$  en fonction de  $m$ ,  $m_c$ ,  $g$  et  $D$ . Calculer ce couple  $C_m$ .

15. En utilisant les caractéristiques de la grue, vérifier que le treuil pourra lever le bateau.

### 1.3 Puissance du treuil pour la mise à l'eau

Lors de la mise à l'eau, le bas de la quille du voilier est placée à une hauteur  $H$  de 10 m par rapport à l'eau.

16. En utilisant le théorème de l'énergie mécanique, déterminer l'expression littérale et la valeur numérique de la vitesse acquise lors de l'impact du bas de la quille avec l'eau si le treuil était débrayé (On néglige les différents frottements, le bateau se trouve ainsi en chute libre).

17. En réalité, la mise à l'eau du bateau est faite à vitesse constante de 0,5 m/s. Quelle doit être la puissance de freinage développée par le treuil ?

## 2 Distance focale d'une lentille divergente - méthode de Badal

La méthode de Badal permet de déterminer expérimentalement la distance focale d'une lentille divergente ( $\mathcal{L}_d$ ) de distance focale image notée  $f'_d$  à partir d'une lentille convergente ( $\mathcal{L}_c$ ) de distance focale image notée  $f'_c$ . Le protocole est le suivant :

- a) Faire l'image d'un objet réel situé à l'infini sur un écran avec la lentille  $\mathcal{L}_c$ .
- b) Mesurer la distance lentille-écran, notée  $d_1$ .
- c) Placer la lentille  $\mathcal{L}_d$  **devant** la lentille  $\mathcal{L}_c$  et espacé de la distance  $d_1$ . (*Note : L'image formée sur l'écran devient floue*).
- d) Reculer l'écran jusqu'à obtenir une image nette. Mesurer  $d_2$  la distance de recul de l'écran par rapport à sa première position.
- e) Le calcul de  $\frac{d_1^2}{d_2}$  donne  $|f'_d|$ .

Les lentilles utilisées sont considérées comme des lentilles minces.

18. Rappeler ce que sont les conditions de Gauss.

On supposera qu'elles sont vérifiées pour que les lois de l'optique géométriques s'appliquent au montage utilisé.

19. Dans quel plan est situé l'image d'un objet situé à l'infini à travers une lentille convergente ? L'image est-elle réelle ou virtuelle ?

20. Faire un tracé de la situation a) du protocole en utilisant un point objet (de l'objet réel mentionné dans le protocole) sur l'axe optique. **Définir** et **repérer** les positions des points caractéristiques de la lentille, notés  $F_c, F'_c, O_c$ . Prendre 3 cm sur le schéma comme distance  $O_c F_c$  et centrer horizontalement  $O_c$  sur la page.

21. Repérer sur le schéma la distance  $d_1$  mentionnée dans l'étape b) du protocole sur le schéma. À quoi correspond cette distance pour la lentille ?

22. Réaliser un **nouveau schéma** représentant le montage de l'étape d) du protocole. Repérer  $F_d, F'_d, O_d$ , en plus des positions précédentes de la lentilles convergente. Sur le schéma, prendre 3 cm comme distance  $O_c F_c$  et 2,5 cm comme distance  $O_d F_d$  en essayant de centrer horizontalement  $O_c$  sur votre page. Repérer clairement les distances  $d_1$  et  $d_2$  sur ce schéma.

23. Utiliser la formule de conjugaison de Newton ci-dessous pour démontrer le point e) du protocole. Pour une lentille de distance focale image  $f'$ , transformant A un point objet en A' son point image conjugué :

$$-f'^2 = \overline{FA} \cdot \overline{F'A'}$$

### 3 Formation du calcaire dans un chauffe-eau (CCP TSI 2021)

#### Données

Produit de solubilité du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  à 298 K :  $K_s = 10^{-8,4}$

La concentration effective en quantité d'une espèce chimique X dissoute à l'équilibre sera notée :  $[\text{X}]_{eq}$

Le tableau périodique des éléments chimiques est fourni sur la figure 2.

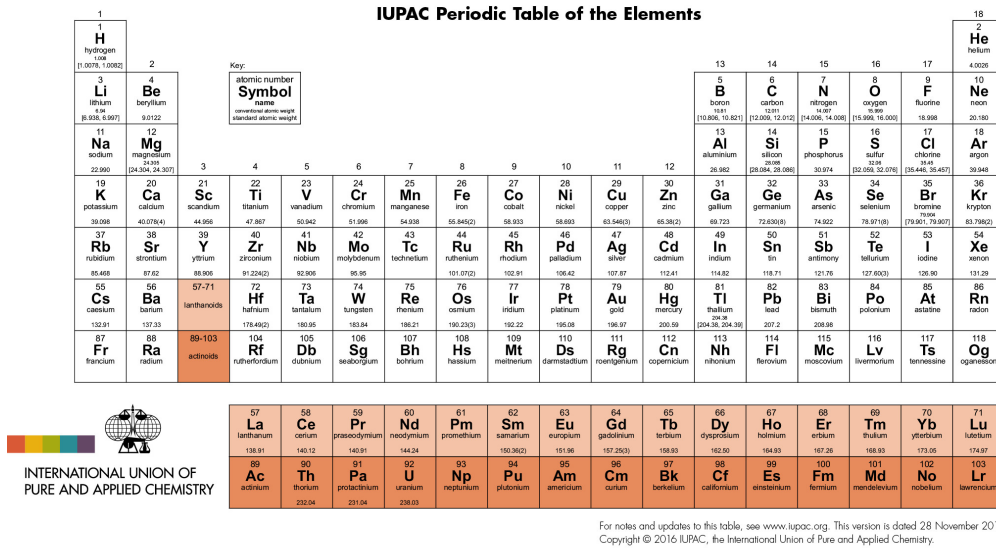


FIGURE 2 – Tableau périodique des éléments chimiques.

L'eau contient de nombreux ions dissous parmi lesquels figurent l'ion calcium en partie responsable de la formation de tartre. Lorsque l'eau est calcaire, le contact direct de la résistance chauffante avec l'eau favorise la formation de tartre qui se dépose sur la résistance et altère sa performance.

24. Préciser le nombre d'électrons de valence des atomes d'hydrogène, de carbone et d'oxygène.
25. L'ion hydrogénocarbonate a pour formule chimique  $\text{HCO}_3^-$ . Établir la représentation de Lewis de l'ion hydrogénocarbonate.

L'ion hydrogénocarbonate appartient aux couples acido-basiques suivants :

- \*  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})/\text{HCO}_3^-(\text{aq})$  auquel on associe la constante d'acidité  $K_{A,1}$  à 298 K ( $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ , appelé acide carbonique, représente le mélange  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ ) ;
- \*  $\text{HCO}_3^-(\text{aq})/\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$  auquel on associe la constante d'acidité  $K_{A,2}$  à 298 K.

26. Donner l'expression de la constante d'acidité  $K_A$  associée à un couple acido-basique  $\text{AH}(\text{aq})/\text{A}^-(\text{aq})$ . En déduire le lien entre  $pK_A = -\log K_A$  et le  $pH$ .

On fournit le diagramme de distribution de l'acide carbonique sur la figure 3.

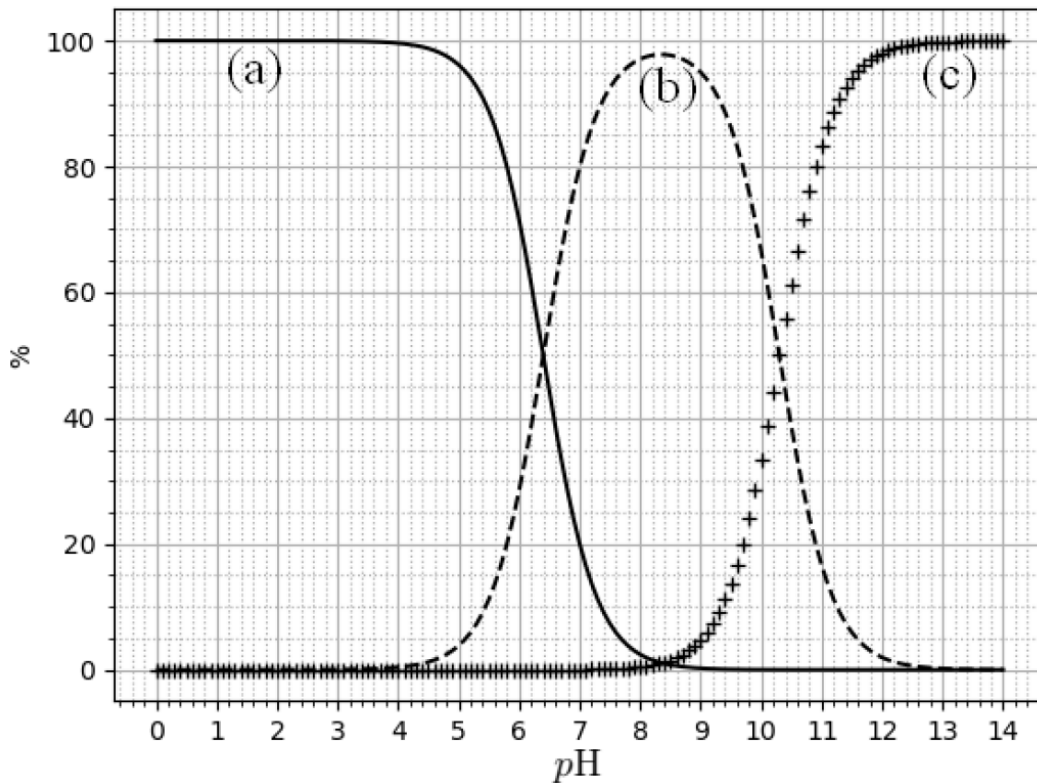


FIGURE 3 – Diagramme de distribution de l'acide carbonique.

27. En expliquant votre démarche, attribuer chaque courbe de distribution ((a),(b) et (c)) à une espèce chimique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$ ).
28. À l'aide du diagramme de distribution de la figure 3, déterminer les valeurs de  $pK_{A,1}$  et  $pK_{A,2}$  en justifiant votre réponse.
29. Quelle est l'espèce majoritaire pour  $7,4 < pH < 9,3$  ?

On s'intéresse à la solubilité  $s$  du carbonate de calcium (composé majoritaire du calcaire) dans l'eau.

30. Écrire l'équation de dissolution du carbonate de calcium dans l'eau.
31. Donner l'expression du produit de solubilité  $K_s$  du carbonate de calcium en assimilant l'activité chimique d'un constituant en solution au rapport de sa concentration effective en quantité sur la concentration standard  $c^\circ = 1 \text{ mol.L}^{-1}$ .
32. Justifier que, pour  $7,4 < pH < 9,3$ , la solubilité  $s$  du carbonate de calcium est telle que  $s = [\text{Ca}^{2+}]_{eqb}$  et  $s \simeq [\text{HCO}_3^-]_{eqb}$ .
33. En déduire l'expression de  $ps = f(pH)$  pour  $7,4 < pH < 9,3$ .

On fournit les graphes suivants :

- \* le graphe du cologarithme décimal de la solubilité  $ps = -\log(s/c^\circ)$  du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3(s)$  en fonction du  $pH$  à 298 K (figure 4);

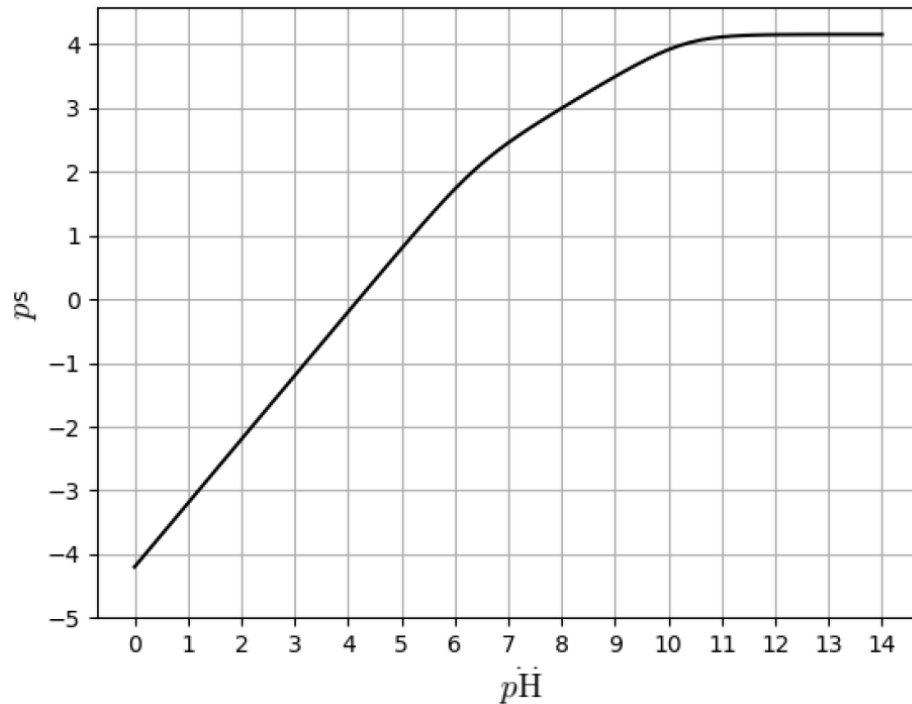


FIGURE 4 – Évolution du  $ps$  de  $\text{CaCO}_3$  en fonction du  $pH$  à  $T = 298 \text{ K}$ .

\* le graphe du cologarithme décimal de la solubilité  $ps$  du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  en fonction du  $pH$  pour différentes températures (figure 5);

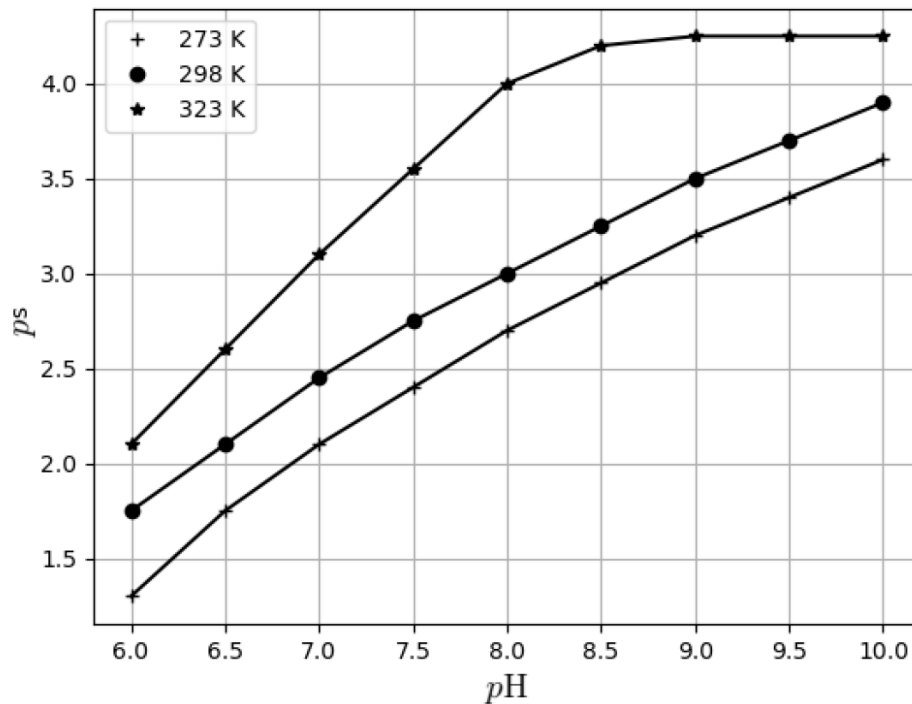


FIGURE 5 – Évolution du  $ps$  de  $\text{CaCO}_3$  en fonction du  $pH$  pour différentes températures.

34. Vérifier la cohérence du résultat précédent avec le graphe fourni sur la figure 4.
35. Dans la cuve d'un chauffe-eau, comment évolue le dépôt de calcaire lorsque le  $pH$  augmente? Justifier.
36. Pour nettoyer le dépôt de calcaire sur la résistance électrique chauffante d'un chauffe-eau, faut-il utiliser une solution acide ou basique? Justifier.
37. Dans la cuve d'un chauffe-eau, comment évolue le dépôt de calcaire lorsque la température augmente? Justifier.

## 4 Les états physiques de l'ammoniac

Données générales : Constante des gaz parfaits :  $R = 8,3 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Conversion entre échelles de température :  $\theta(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$

Pression atmosphérique :  $P_{\text{atm}} = 1,0 \text{ bar} = 1,0.10^5 \text{ Pa}$

Données relatives à l'ammoniac :

Masse molaire :  $M = 17 \text{ g.mol}^{-1}$

Température du point triple :  $T_{\text{III}} = 195 \text{ K}$

Pression du point triple :  $P_{\text{III}} = 0,061 \text{ bar}$

Température du point critique :  $T_{\text{C}} = 405 \text{ K}$

Pression du point critique :  $P_{\text{C}} = 113 \text{ bar}$

Masse volumique critique :  $\rho_{\text{C}} = 225 \text{ kg.m}^{-3}$

Données relatives à l'ammoniac sous  $P_{\text{atm}}$  :

Température de fusion :  $\theta_{\text{fus}} = -77,7^{\circ}\text{C}$

Température d'ébullition :  $\theta_{\text{eb}} = -33,3^{\circ}\text{C}$

Masse volumique du liquide :  $\rho_{\text{liq}} = 0,67 \text{ kg.L}^{-1}$

Masse volumique du gaz à  $\theta_{\text{eb}}$  :  $\rho_{\text{gaz}, \theta_{\text{eb}}} = 0,89 \text{ kg.m}^{-3}$

Masse volumique du gaz à  $\theta_0 = 15^{\circ}\text{C}$  :  $\rho_{\text{g}, \theta_0} = 0,73 \text{ kg.m}^{-3}$

### Aide aux calculs :

On fournit les valeurs numériques suivantes :

$$\frac{8,3 \times 20}{17} = 9,8 \quad ; \quad \frac{8,3 \times 29}{17} = 14 \quad ; \quad \frac{17}{8,3 \times 29} = 0,071 \quad ; \quad \frac{8,3 \times 405}{113 \times 17} = 1,7 \quad ; \quad \frac{1}{0,225} = 4,4$$

L'ammoniac  $\text{NH}_3$  est un corps pur de grande importance industrielle. Il est utilisé comme fluide frigorigène, c'est-à-dire chargé de transporter la chaleur dans certaines machines frigorifiques. Sous forme liquide, il sert de solvant pour certaines réactions de chimie organique. Il permet en particulier la réalisation de réductions, car il est possible de former des solutions d'électrons dissous dans l'ammoniac liquide. Le but de ce problème est de s'intéresser au changement d'état permettant de former de l'ammoniac liquide à partir d'ammoniac vapeur. Dans l'ensemble du problème, on étudie des systèmes constitués exclusivement d'ammoniac ; en particulier, les phases vapeur ne contiennent que de l'ammoniac (et pas d'air par exemple). Le diagramme de la figure 6, en échelle semi-logarithmique, précise la dépendance de la pression de vapeur saturante de l'ammoniac en fonction de la température.

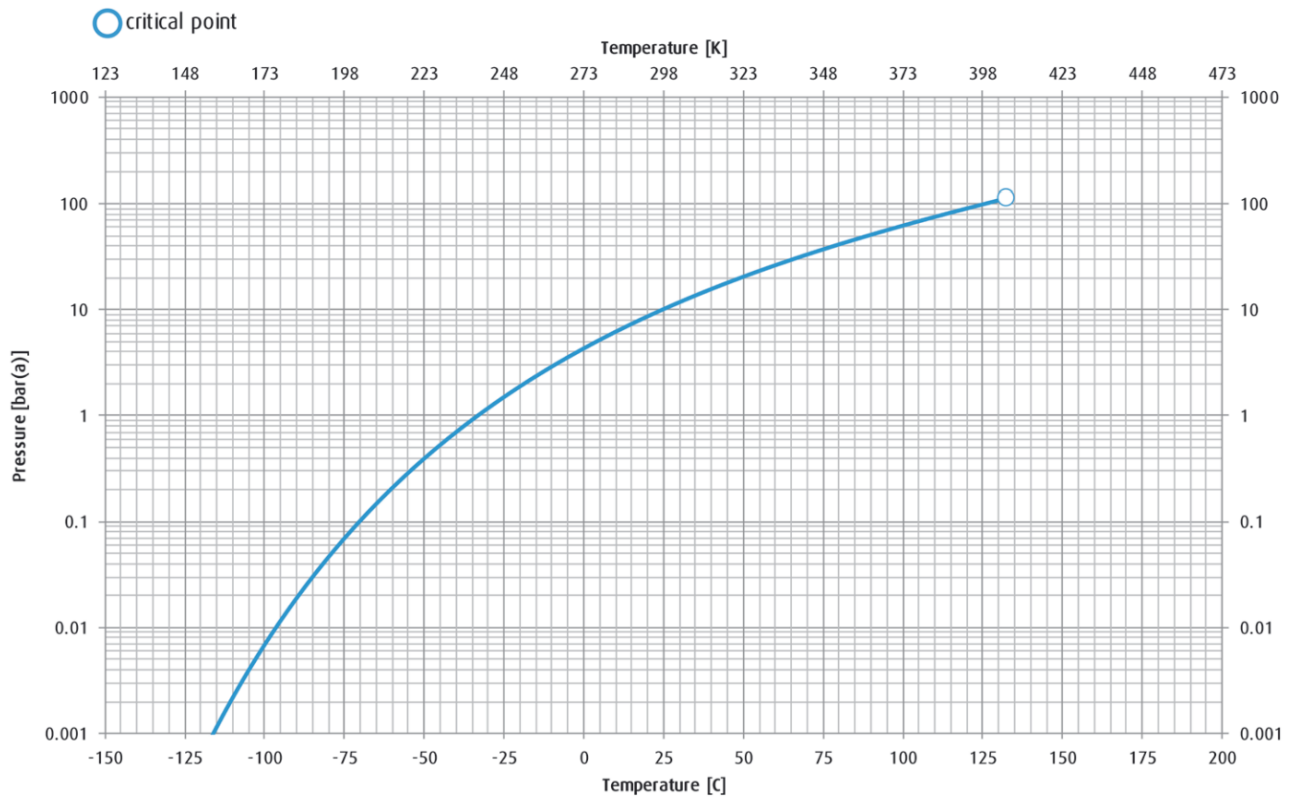


FIGURE 6 – Évolution de la pression de vapeur saturante de l'ammoniac en fonction de la température.

#### 4.1 Diagramme de phases de l'ammoniac

38. Tracer en grand (sur toute la largeur de la copie) l'allure du diagramme de phases complet de l'ammoniac en coordonnées (T, P), en précisant le domaine de chacune des phases, et en reportant les coordonnées des points particuliers.
39. À quelle partie de ce diagramme de phases la courbe de la figure 6 correspond-elle ?
40. Sous la pression atmosphérique, à quelle température observe-t-on l'ébullition de l'ammoniac ? la fusion de l'ammoniac ? Placer qualitativement (mais logiquement par rapport aux valeurs déjà précisées) ces deux points sur le diagramme de phases.
41. En déduire sous quel état physique se trouve l'ammoniac sous pression atmosphérique et à 20°C, et placer le point correspondant sur le diagramme de phases.
42. Peut-on avoir de l'ammoniac liquide à 20 °C ? Si oui, à quelle condition sur la pression ? Justifier.
43. Peut-on observer l'ébullition de l'ammoniac sous 120 bar ? Si oui, à quelle condition sur la température ? Justifier.

#### 4.2 Ammoniac liquide et ammoniac vapeur

44. Le volume massique de l'ammoniac liquide dépend-il beaucoup de la température ? Justifier, et estimer sa valeur en USI.
45. En assimilant la vapeur d'ammoniac à un gaz parfait, estimer, en USI, la valeur de son volume massique sous pression atmosphérique et à  $\theta_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Comparer à la valeur expérimentale et conclure.
46. En assimilant la vapeur d'ammoniac à un gaz parfait, calculer son volume massique sous 113 bar et à 132 °C. Comparer à la valeur expérimentale et conclure.
47. On liquéfie totalement un échantillon de volume  $V_0 = 1,0 \text{ m}^3$  d'ammoniac vapeur initialement sous  $P_{\text{atm}}$  et à  $\theta_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Calculer le volume final  $V_f$  de l'échantillon.