Epreuve de Physique B - Chimie

Durée 2 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

AVERTISSEMENT

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

Le sujet est composé de cinq parties indépendantes qui peuvent être traitées dans l'ordre de leur choix par les candidats.

Dans chaque partie, de nombreuses questions sont indépendantes.

Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance.

Tournez la page S.V.P.

Données à 25°C :

$HNO_{3(aq)}/NO_3^-{}_{(aq)}$ pKa = -1,37
$HNO_{2(aq)}/NO_2^-{}_{(aq)}$ pKa = 3,3
$NH_4^+{}_{(aq)}/NH_{3(aq)}$ pKa = 9,2

A T = 298 K :

espèces	**$N_{2(g)}$**	**$H_{2(g)}$**	**$NH_{3(g)}$**
$\Delta_f H°$ (kJ. mol^{-1})	**?**	**?**	**-46**
$S_m°$ (J. mol^{-1}. K^{-1})	**190**	**130**	**192**

E° ($NO_3^-{}_{(aq)}/HNO_{2(aq)}$) = 0,94 V
E°($NO_3^-{}_{(aq)}/NO_{(g)}$) = 0,96 V
E° ($HNO_{2(aq)}/NO_{(g)}$) = 0,99 V
E° ($Cu^{2+}{}_{(aq)}/Cu_{(s)}$) = 0,34 V
E° ($Fe^{3+}{}_{(aq)}/ Fe^{2+}{}_{(aq)}$)= 0,77 V
E°($MnO_4^-{}_{(aq)}/ Mn^{2+}{}_{(aq)}$) = 1,5 V

$\frac{RT}{F} ln\,(10) = 0{,}06\ V$ à 25°C
Volume molaire d'un gaz V_m = 22,4 L. mol^{-1}
Faraday : 1.F = 9,65. 10^4 C.mol^{-1}
R= 8,3 J. mol^{-1}. K^{-1}

Paramètre de la maille du nitrure de titane a = 425 pm
Constante d'Avogadro Na = 6,0.10^{23} mol^{-1}
r(Ti) = 145 pm
$\sqrt{2} - 1 = 0{,}414$

Masse molaire du cuivre = 63,5 g. mol^{-1}
Masse molaire du titane = 48,0 g. mol^{-1}
Masse molaire de l'azote = 14,0 g. mol^{-1}
Masse molaire de NO_3^- = 62,0 g. mol^{-1}

La chimie de l'azote : Quelques applications industrielles

1. (20%) Synthèse de l'ammoniac

Le procédé *Haber* est un procédé chimique en phase gazeuse servant à la synthèse de l'ammoniac $NH_{3(g)}$ par hydrogénation du diazote $N_{2(g)}$ atmosphérique par le dihydrogène $H_{2(g)}$ en présence d'un catalyseur.

Q.1 Ecrire l'équation de la réaction, notée (1) pour une mole de diazote.

Q.2 Que valent les enthalpies standard de formation de $N_{2(g)}$ et $H_{2(g)}$? Justifier.

Q.3 Calculer l'enthalpie standard de réaction de la réaction (1). Que peut-on en déduire ?

Q.4 Calculer l'entropie standard de la réaction (1). Justifier son signe.

Q.5 Exprimer la constante d'équilibre de cette réaction à 300 K. en fonction des grandeurs thermodynamiques calculées dans les questions précédentes. On obtient : $K° = 6{,}03.10^5$

Q.6 Quelle est l'influence d'une augmentation de pression isotherme sur l'équilibre (1) ? Une justification rigoureuse est attendue

Q.7 Quelle est l'influence d'une augmentation de température isobare sur l'équilibre (1) ? Une justification rigoureuse est attendue.

Q.8 Indiquer la définition d'un catalyseur. Expliquer pourquoi on utilise un catalyseur dans la synthèse de l'ammoniac.

Q.9 La synthèse de l'acide nitrique HNO_3 à partir de l'ammoniac passe notamment par les intermédiaires NO et NO_2. Proposer une représentation de Lewis de NH_3, NO et NO_2 sachant qu'aucune d'entre elles ne fait intervenir de liaison O-O.

Q.10 NO et NO_2 possèdent une propriété chimique particulière. Laquelle ? Justifier la possibilité de dimérisation de NO et NO_2.

2. (20%) Diagramme potentiel-pH

On se propose d'étudier le diagramme potentiel-pH simplifié de l'azote en se limitant aux substances ions nitrates $NO_3^-{}_{(aq)}$, acide nitreux $HNO_{2(aq)}$, ions nitrites $NO_2^-{}_{(aq)}$ et monoxyde d'azote $NO_{(g)}$. La ligne frontière qui sépare deux domaines de prédominance ou de stabilité correspondra à une concentration de 1 $mol.L^{-1}$ pour chaque espèce en solution, et pour les gaz, à la pression standard de référence P° = 1 bar.

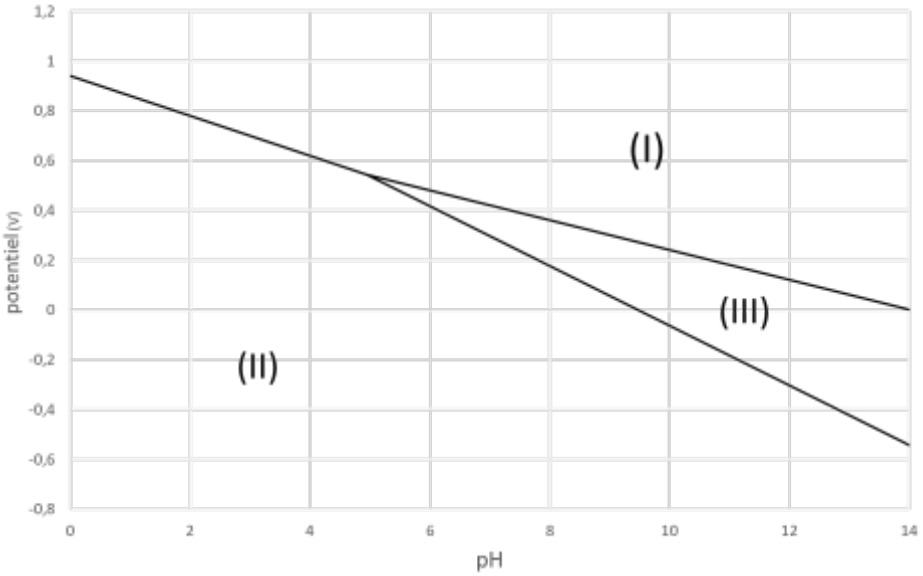
Q.11 En vous aidant de la valeur de pKa de l'acide nitrique HNO_3, expliquer pourquoi cette espèce n'intervient pas dans le diagramme potentiel-pH. Ecrire l'équation de dissolution de cet acide en solution aqueuse.

Q.12 Ecrire les équations des demi-réactions redox associées aux couples $NO_3^-{}_{(aq)}/HNO_{2(aq)}$ et $HNO_{2(aq)}/NO_{(g)}$

Q.13 Que peut-on dire de la stabilité de HNO_2 ? Ecrire l'équation correspondante et nommer la réaction.

Q.14 Donner les degrés d'oxydation de l'azote dans les quatre espèces azotées concernées. A l'aide d'un schéma présentant en ordonnée le degré d'oxydation et en abscisse les valeurs de pH, indiquer les domaines de prédominance ou de stabilité des différentes espèces de l'azote.

Q.15 On fournit ci-dessous un diagramme potentiel-pH muet de l'élément azote. Reporter le diagramme sur votre copie en indiquant la correspondance entre les espèces chimiques $NO_{(g)}$, $NO_3^-{}_{(aq)}$ et $NO_2^-{}_{(aq)}$ et les zones I, II et III.



Q.16 Quel couple redox faut-il prendre en compte pour tracer la ligne frontière séparant les domaines de I et III? Donner l'équation de la ligne frontière en fonction des valeurs de pH et du potentiel standard du couple redox-considéré.

Q.17 Prévoir le comportement d'une lame de cuivre de 12,7 g plongée dans 300 mL d'une solution d'acide nitrique de concentration c = 2,00 mol.L^{-1} : écrire une équation pour la réaction qui a lieu. Quelle est la quantité de matière initiale de chaque réactif ? En déduire le réactif limitant.

Q.18 Calculer l'avancement de la réaction ainsi que les quantités de matière des espèces à l'issue de la réaction.

Q.19 Quelle est la formule du gaz formé ? Indiquer la relation entre la quantité de matière de gaz formé et le volume de gaz produit.

Q.20 Calculer la charge transférée lors de la réaction.

3. (20%) Le nitrure de titane

Le nitrure de titane présente une dureté dépassant celle de la plupart des matériaux métallique et a une température de fusion très élevée (environ 3000°C). Ces remarquables propriétés physiques sont contrebalancées par sa fragilité, ce qui conduit à l'employer principalement comme film de revêtement. Ce composé présente une structure cristalline dans laquelle les

atomes de titane forment un réseau cubique à face centrée, les atomes d'azote occupant tous les sites interstitiels octaédriques de la structure.

Q.21 Représenter en perspective la maille du réseau métallique. Vous indiquerez et décrirez précisément la localisation et le nombre de sites octaédriques.

Q.22 Déterminer le nombre de motifs par maille, ainsi que la coordinence du titane et de l'azote

Q.23 Donner un ordre de grandeur de la masse volumique du nitrure de titane.

Q.24 Ecrire la relation de tangence entre le métal et l'azote.

Q.25 En considérant que les atomes de titane ne doivent pas être tangents, donner l'inégalité vérifiée par le rayon r_{Ti} des atomes métalliques.

Q.26 Indiquer la relation entre la taille du site octaédrique et r_{Ti} le rayon de l'atome métallique dans une maille cubique à face centrée de titane pur de paramètre de maille a.

Q.27 Le rayon de l'atome d'azote est de 65 pm. Que pouvez-vous en conclure ?

4. (20%) Teneur en élément azote d'un engrais

L'ammonitrate est un engrais azoté solide, bon marché, très utilisé dans l'agriculture. Il est vendu par sac de 500 kg et contient du nitrate d'ammonium $NH_4NO_{3(s)}$. Les indications fournies par le fabricant d'engrais sur le sac à la vente stipulent que le pourcentage en masse de l'élément azote N est de 34,4%.

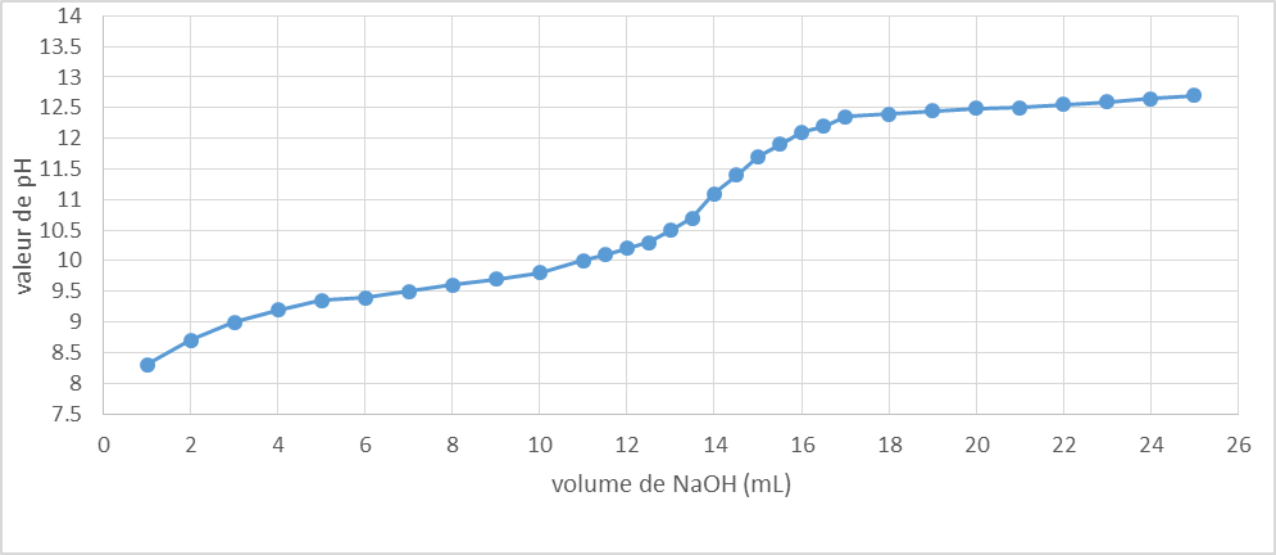
Afin de vérifier l'indication du fabricant, on dose les ions ammonium $NH_4^+{}_{(aq)}$ présents dans l'engrais en introduisant dans un bécher V_1 =10,0 mL d'une solution préparée en dissolvant 6,00 g d'engrais dans une fiole jaugée de V_0 = 250 mL. Cette solution est dosée à l'aide d'une solution d'hydroxyde de sodium NaOH de concentration c = 0,200 mol.L^{-1}. A l'équivalence, le volume de soude ajouté V_E est de 14,0 mL.

Q.28 Le nitrate d'ammonium est très soluble dans l'eau. Ecrire la réaction de dissolution correspondante.

Q.29 L'ion ammonium $NH_4^+{}_{(aq)}$ est-il un acide ou une base selon Brönsted ? Justifier la réponse.

Q.30 Ecrire l'équation de la réaction correspondant au titrage.

Q.31 La figure ci-après représente la courbe pH = f(V_{NaOH}). Indiquer une méthode graphique pour trouver le point d'équivalence. Donner les coordonnées ce point.



Q.32 Quelles sont toutes les espèces chimiques présentes dans le mélange réactionnel à l'équivalence ? Justifier le pH basique de la solution en ce point.

Q.33 Donner la formule littérale permettant de calculer la quantité de matière d'ions $NH_4^+{}_{(aq)}$ dans la fiole jaugée en fonction des données.
L'application numérique donne $7{,}00.10^{-2}$ mol d'ions $NH_4^+{}_{(aq)}$. En déduire la quantité de nitrate d'ammonium présente dans cette fiole.

Q.34 Calculer la masse d'azote (arrondie au gramme près) présente dans l'échantillon. Les indications du fabricant sont-elles correctes ?

<u>5. (20%) Pollution par les nitrates : dosage indirect des nitrates contenus dans une eau</u>

Les nitrates ne sont dangereux pour la santé que s'ils sont en trop grande concentration dans l'eau. L'Organisation Mondiale de la Santé préconise, pour une personne, de ne pas consommer plus de 3,65 mg d'ions nitrate par kilogramme de masse corporelle et par jour. La législation française impose donc une teneur inférieure à 50 $mg.L^{-1}$ dans les eaux de consommation. Des analyses sont effectuées régulièrement pour vérifier la potabilité de l'eau, en particulier la teneur en ions nitrates.

Principe du dosage :

Lors du dosage indirect, on ajoute un excès de sel de Mohr, de formule $Fe(SO_4)_2(NH_4)_2.6H_2O_{(s)}$, à un volume connu d'eau. Dans le sel de Mohr, le fer est à l'état d'oxydation +II.

Les ions $Fe^{2+}{}_{(aq)}$ en excès sont ensuite dosés par des ions permanganate $MnO_4^-{}_{(aq)}$. La concentration en nitrate dans l'eau s'en déduit.

Protocole expérimental du dosage :

Pour effectuer ce dosage, on introduit dans cet ordre, dans un erlenmeyer, V_0 = 50,0 mL d'eau, puis 10 mL de solution d'acide sulfurique H_2SO_4 à 5 mol. L^{-1} et V_1= 100,0 mL d'une solution aqueuse de sel de Mohr de concentration molaire c_1 = 1,00 $mmol.L^{-1}$. Après 45 min de chauffage au bain-marie, on dose ensuite les ions $Fe^{2+}{}_{(aq)}$ en excès à l'aide d'une solution de permanganate de potassium $KMnO_4$ de concentration c_2 = 3,00. 10^{-4} mol. L^{-1}. On repère

l'équivalence grâce au changement de couleur du mélange réactionnel, et on trouve un volume équivalent V = 11,0 mL pour l'eau analysée.

Q.35 Ecrire les deux demi-équations d'oxydo-réduction des couples $NO_3^-{}_{(aq)}/NO_{(g)}$ et $Fe^{3+}{}_{(aq)}/Fe^{2+}{}_{(aq)}$.

Q.36 En déduire l'équation de la réaction d'oxydo-réduction ayant lieu dans l'erlenmeyer avant le dosage. Justifier le fait que cette réaction est quasi-totale.

Q.37 En déduire une relation entre la quantité de matière de Fe^{2+} restants présente dans l'erlenmeyer et les quantités de matière initiales des réactifs.

Q.38 Ecrire la réaction du dosage des ions $Fe^{2+}{}_{(aq)}$ par les ions permanganates.

Q.39 Donner l'expression littérale permettant de calculer la quantité d'ions $NO_3^-{}_{(aq)}$ présents dans l'échantillon d'eau. Le calcul donne 2,78 10^{-5} moles d'ions $NO_3^-{}_{(aq)}$.

Q.40 Peut-on considérer que l'eau dosée soit considérée comme potable ?

Q.41 Quel volume de cette eau un enfant de 35 kg peut-il boire par jour sans préjudices pour sa santé ?

FIN DE L'ÉPREUVE

Epreuve de Physique B - Thermodynamique

Durée 2h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

AVERTISSEMENT

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

CONSIGNES :

- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à bille à encre foncée : bleue ou noire.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est interdit.
- Remplir sur chaque copie en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom, numéro inscription, date de naissance, le libellé du concours, le libellé de l'épreuve et la session.
- Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.
- Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance

Tournez la page S.V.P

I - Sonder l'atmosphère

L'atmosphère entoure toute la Terre et permet à toutes les espèces vivantes terriennes de respirer pour vivre. Les phénomènes physiques intervenant dans l'atmosphère sont nombreux et caractérisent en fait différentes couches en fonction de l'altitude : de la troposphère au niveau du sol jusqu'à l'ionosphère couche d'atmosphère la plus haute avant l'Espace. On se propose dans ce sujet d'étudier la façon dont les météorologistes sondent les basses couches de l'atmosphère (troposphère et basse stratosphère) pour tenter de comprendre et de modéliser les phénomènes météorologiques.

Données numériques :

- ▷ Rayon de la Terre : $R_T = 6,4.10^3$ km
- ▷ Accélération de la pesanteur au niveau du sol : $g = 10$ m.s^{-2}
- ▷ Constante des gaz parfaits : $R = 8,3$ J.K^{-1}.mol^{-1}
- ▷ Masse molaire de l'air : $M_{air} = 29$ g/mol
- ▷ Masse molaire de l'hélium : $M_{He} = 4$ g/mol
- ▷ Masse molaire de l'eau : $M_{eau} = 18$ g/mol
- ▷ Enthalpie massique de vaporisation de l'eau (supposée indépendante de la température) : $\ell_v = 2100$ kJ/kg

Quelques applications numériques :
$\ln(1,1) = 0,1$, $\ln(2) = 0,7$, $\ln(10) = 2,3$, $\ln(14) = 2,6$, $8,3 \times 273 \simeq 2300$

A - Modéliser l'atmosphère

Toute prévision météorologique est basée sur un modèle fiable de l'atmosphère, rendant compte en particulier de la pression, de la température et de l'hygrométrie (humidité de l'air) en différents points de l'espace. Des mesures expérimentales de ces grandeurs en fonction de l'altitude sont ainsi effectuées régulièrement à l'aide de ballons-sonde pour permettre d'affiner les modèles informatiques existants et de prévoir les éventuelles formations nuageuses.
Dans cette partie, le champ de pesanteur est uniforme, égal à sa valeur au niveau du sol. L'air sera toujours considéré localement comme un gaz parfait.

A.1 - Modèle simple de l'atmosphère isotherme

On considère dans un premier temps le cas d'une atmosphère isotherme au repos, dans laquelle la température est uniforme et vaut $T_0 = 273$ K. La pression au niveau du sol vaut $P_0 = 1,0$ bar. On appelle $P(z)$ la pression qui règne à l'altitude z.

1. Faire un bilan des forces s'exerçant sur une tranche de fluide de base S, comprise entre les altitudes z et $z + dz$ (figure 1). En déduire l'équation différentielle vérifiée par $P(z)$.

2. Déterminer l'expression de la pression $P(z)$ qui règne à l'altitude z. Le tracé de $P(z)$ est reporté sur la figure 3 ci-après (courbe en pointillés). On pourra introduire une distance H dont on donnera l'expression.

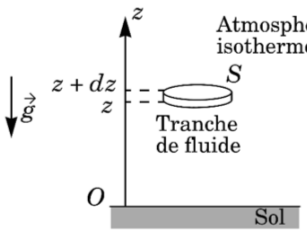


Figure 1 : tranche de fluide dans le modèle de l'atmosphère isotherme

3. Déduire de ce qui précède l'ordre de grandeur de l'épaisseur de l'atmosphère isotherme dans le cadre de ce modèle. Faire l'application numérique. Montrer que l'on peut retrouver ces résultats graphiquement.

A.2 - Profil de température et de pression dans l'atmosphère réelle

Les données transmises par un ballon-sonde au cours de la traversée de la troposphère et de la basse stratosphère permettent de tracer les profils réels de température et de pression régnant à la verticale d'une station météo. Les résultats expérimentaux sont rassemblés sur la figure 2 ci-après.

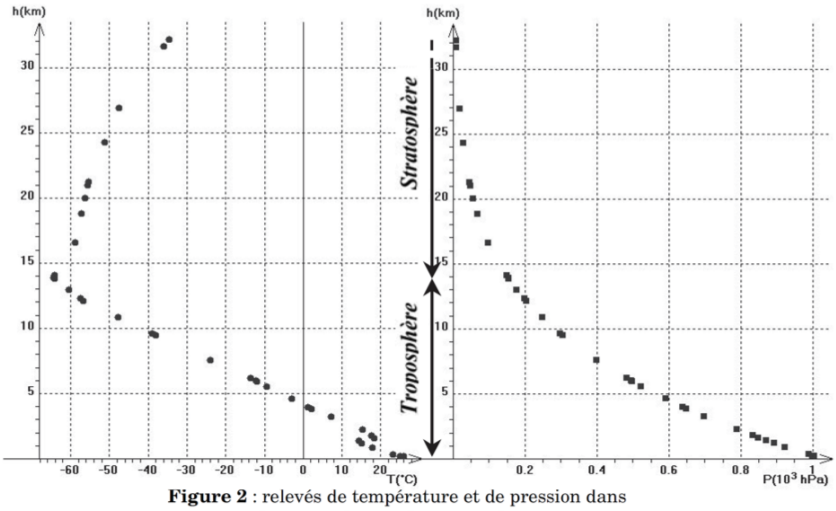


Figure 2 : relevés de température et de pression dans la troposphère et la stratosphère

4. Quelle différence essentielle y-a-t-il entre la stratosphère et la troposphère ?

5. Que pensez-vous du modèle vu en partie A.1 de l'atmosphère isotherme pour décrire la troposphère ? On comparera les profils réels de température et de pression avec les résultats du modèle (voir figure 3 courbe en pointillés).

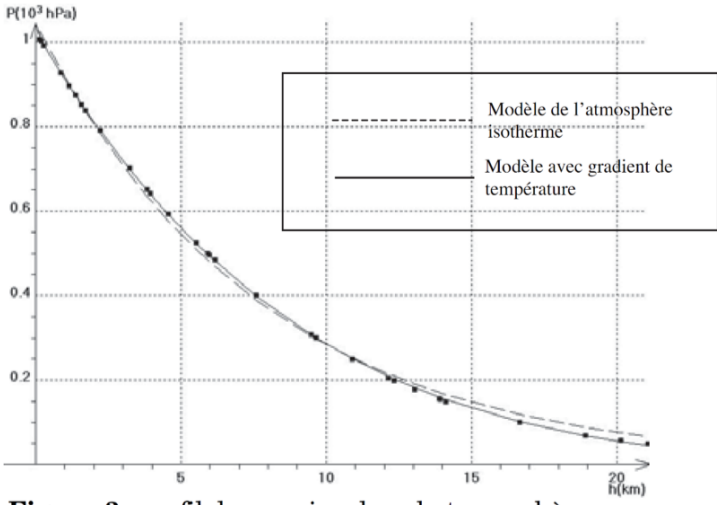


Figure 3 : profil de pression dans la troposphère ; en pointillés, modèle de l'atmosphère isotherme

On cherche à affiner le modèle précédent en considérant cette fois un profil de température de la forme (dit aussi modèle avec gradient de température) : $T(z) = T_0 - az$ avec T_0 et a des paramètres constants.

6. Commenter le choix de ce profil de température et évaluer numériquement T_0 et a.

7. Montrer que le champ de pression dans la troposphère se met sous la forme : $P(z) = P_0(1 - bz)^\alpha$ où b et α sont des paramètres constants à déterminer.

8. Comparer alors ce champ de pression avec celui obtenu en A.1 pour l'atmosphère isotherme lorsque l'on se place à faible altitude ($bz \ll 1$).

Un logiciel informatique de traitement de données permet d'ajuster les valeurs de P_0, b et α pour que le modèle décrive correctement les points expérimentaux. On obtient ainsi : $P_0 = 1,03.10^5$ Pa, $b = 2.10^{-5}$ m^{-1} et $\alpha = 6$.
La courbe correspondante est tracée en trait plein sur la figure 3.

9. Déduire de ces résultats une autre détermination de T_0 et a et comparer aux valeurs trouvées en Q**6.**. Conclure quant à la validité de ce modèle pour décrire la troposphère.

10. En utilisant une grandeur homogène à une distance, évaluer l'épaisseur de l'atmosphère dans le modèle avec gradient de température. Conclure.

B - Etude d'un ballon-sonde

Le ballon-sonde est le moyen le plus simple et le plus économique d'envoyer une charge dans les différentes couches de l'atmosphère. Les ballons météorologiques, embarquant du matériel scientifique de mesure, explorent par exemple toute la troposphère et la basse stratosphère. On se propose ici d'étudier deux variantes d'un ballon-sonde stratosphérique : ballon ouvert à l'hélium et ballon fermé à l'hélium. Dans toute cette partie, l'atmosphère est supposée isotherme, de température, $T_0 = 273$ K et le champ de pression est celui fourni par la figure 3. La pression au niveau du sol vaut $P_0 = 1,0.10^5$ Pa.
Tous les gaz sont considérés comme parfaits. On négligera la force de frottement de l'air.

B.1 - Le ballon stratosphérique ouvert (BSO)

On considère le ballon-sonde, représenté sur la figure 4 ci-contre, composé :

- ▷ d'une enveloppe supposée sphérique, de volume $V = 100$ m^3 (correspondant à un diamètre de l'ordre de 6 m), ouverte sur l'extérieur par des manches d'évacuation situées à la base du ballon ;
- ▷ d'un parachute permettant de ralentir la descente du ballon à la fin de la mission ;
- ▷ d'un réflecteur radar rendant plus facile le suivi à distance du ballon ;
- ▷ d'une nacelle, contenant les appareils de mesure, le système de télécommunication et de positionnement GPS.

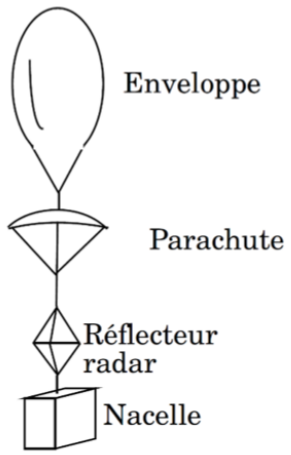


Figure 4 : Ballon-sonde

Dans ce type de ballon, l'enveloppe est indéformable et garde un volume constant. Le ballon étant ouvert à sa base, la pression à l'intérieur du ballon est identique à tout moment à celle qui règne à l'extérieur. Au moment du lancement, le ballon est gonflé à l'hélium. On suppose que la température à l'intérieur du ballon reste constante, égale à la température extérieure T_0. La masse m de l'ensemble {enveloppe + parachute + réflecteur + nacelle} reste constante au cours du vol. Le volume du ballon est assimilé à celui de son enveloppe.

11. Le ballon-sonde étant prévu pour monter à quelques dizaines de kilomètres d'altitude, faut-il tenir compte de la variation du champ de pesanteur, assimilé ici au champ de gravitation terrestre, avec l'altitude ? Évaluer la variation relative maximale $\Delta g/g$ du champ de pesanteur entre le sol et l'altitude $z = 20$ km. On pourra faire un développement limité au premier ordre en le justifiant. Conclure.

12. Déterminer la masse m_{gaz} de gaz contenue dans l'enveloppe au décollage.

13. Effectuer un bilan des forces précis s'exerçant sur le ballon au moment du décollage. En déduire une condition sur m pour que le ballon décolle effectivement.

On considère dans la suite $m = 10$ kg.

14. Expliquer ce qui se passe dans le ballon au cours de son ascension.

15. Le plafond est atteint lorsque le ballon est à son altitude maximale. À quelle condition le ballon plafonne-t-il ? Estimer alors l'altitude maximale atteinte par le ballon-sonde.

Dès que le plafond est atteint, un système de largage libère le ballon de son enveloppe. Le ballon entame alors sa descente, ralentie par le parachute. Une fois retrouvés au sol, les appareils de mesure pourront servir une nouvelle fois pour une prochaine mission.

B.2 - Cas d'un ballon fermé

Le ballon-sonde possède cette fois une enveloppe élastique fermée. Cette enveloppe est remplie d'une masse $m_{He} = 0,80$ kg d'hélium au moment du lancement. Les accessoires sont identiques à ceux du ballon vu en B.1. On suppose comme précédemment que la température à l'intérieur du ballon est identique à chaque instant à celle de l'air extérieur T_0. Les observations indiquent que le ballon a un diamètre de $r_{ini} = 2$ m au décollage pour atteindre son diamètre maximal de $r_{fin} = 4,6$ m, juste avant que l'enveloppe n'éclate à son altitude maximale.

16. Expliquer qualitativement les phénomènes qui provoquent l'éclatement du ballon.

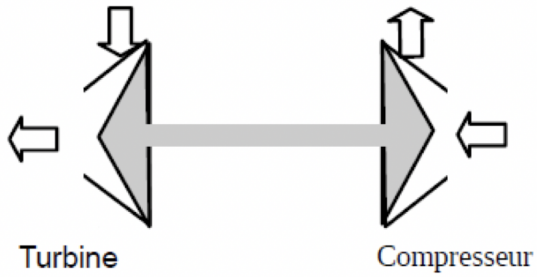
L'élasticité de l'enveloppe s'explique par les propriétés de tension superficielle du matériau, qui imposent la relation suivante entre la pression intérieure P_{int} du ballon et la pression extérieure de l'air P_{ext} (formule de Laplace) : $P_{int} - P_{ext} = \dfrac{4\sigma}{r}$ où σ est appelé coefficient de tension superficielle et r le rayon de l'enveloppe sphérique.

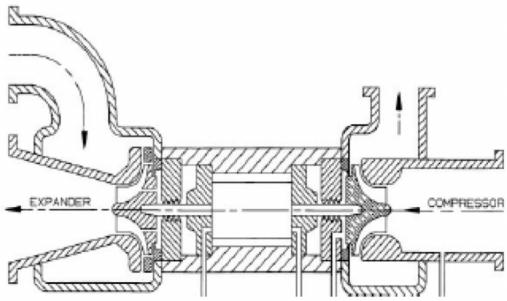
17. Préciser l'unité de σ. Etablir l'expression de P_{int} au décollage puis en déduire celle de σ. Numériquement on trouve $\sigma = 2,1.10^3$ USI.

18. Etablir l'expression de l'altitude maximale z_{max} atteinte par le ballon-sonde en fonction de H, P_0, T_0, m_{He}, r_{fin}, σ et des constantes introduites dans les données numériques au début du sujet. Numériquement on trouve $z_{max} = 22$ km, commenter.

II - Etude d'un système frigorifique avec un cycle de Brayton inversé

Document 1 - Description d'un turbo-détendeur cryogénique





L'objectif de cet organe n'est pas la compression mais l'expansion du gaz à travers la turbine afin d'abaisser la température du gaz. Le design de l'admission et de la partie tournante de la turbine donnent d'abord une grande vitesse au gaz avant qu'il soit détendu par l'augmentation du volume disponible autour de l'axe. Cette détente donne un travail mécanique qu'on récupère sur l'axe et qui peut servir à compresser sur le même axe.
Cette technique d'un seul et même axe est utilisée pour les turbines à gaz dans le cycle de Brayton ou dans le cycle de Joule. Le cycle de refroidissement correspondant porte donc le nom de cycle de Brayton inversé. De multiples inventions de roulements et de lubrifications ont eu lieu et permettent des vitesses de rotation très importantes à de basses températures d'utilisation.

Document 2 - Description d'un cycle de Brayton inversé avec l'air pour fluide

Ce cycle utilisant l'air sert à réfrigérer un fluide à -70 °C, il est schématisé en annexe. Les variations d'énergies potentielle et cinétique entre chaque organe du cycle sont négligées par rapport aux variations d'enthalpie. Les compressions et le turbinage sont considérés comme isentropiques. La transmission de puissance est supposée intégrale entre turbine et compresseur. Les échangeurs sont considérés comme isobares. Le fluide utilisé est l'air qui est de température initiale -20 °C (état A) à 1,0 bar. L'air est comprimé de 1,0 bar à 10 bar de manière isentropique par deux compresseurs. Le premier compresseur est entraîné par la turbine du turbo-détendeur et amène l'air à l'état (B). L'air sort à l'état (C) à -10 °C après avoir parcouru un échangeur alimenté au frigorigène R134a. La sortie du deuxième compresseur est l'état (D) à 10 bar. Ce compresseur est entraîné par un moteur électrique. L'air est ensuite refroidi à -10 °C dans un deuxième échangeur au frigorigène R134a et sort à l'état (E). L'air toujours compressé entraîne ensuite la turbine en se détendant jusqu'à 1,0 bar (état F). Pour finir, l'air en traversant deux échangeurs augmente en température. Entre la température de -140 °C et -75 °C, l'air refroidit un fluide qu'on cherche à réfrigérer à -70 °C et sort à l'état (G). Ensuite l'air refroidit le fluide R134a jusqu'à revenir à l'état (A). Il faut d'autre part refroidir le fluide R134a par un système complémentaire.

19. Rappeler le premier principe avec l'enthalpie massique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie.

20. Compléter le schéma en annexe avec les lettres des différents états du cycle.

21. En utilisant le diagramme $\{\log(P), h\}$ de l'air (R729) fourni en annexe (unité des isothermes en °C, unité des isentropes en kJ.kg^{-1}.K^{-1}), exprimer puis calculer le travail massique reçu par l'air lors de la détente isentropique de (E) à (F). En déduire le travail massique reçu par l'air lors de la compression de (A) à (B).

22. Compléter le tableau de l'annexe, placer les points et tracer le cycle sur le diagramme $\{\log(P), h\}$ de l'air en annexe.

23. Exprimer et calculer le transfert thermique reçu par l'air en contact avec le fluide qui est à maintenir à -70 °C.

24. On considère deux sources à -70 °C et -25 °C. Redémontrer, exprimer puis calculer l'efficacité de Carnot dans le cas d'une machine réversible qui refroidit la source froide grâce à du travail apporté par l'extérieur.

25. En considérant que le travail du compresseur électrique soit la seule énergie dépensée, exprimer et calculer l'efficacité du cycle. Commenter.

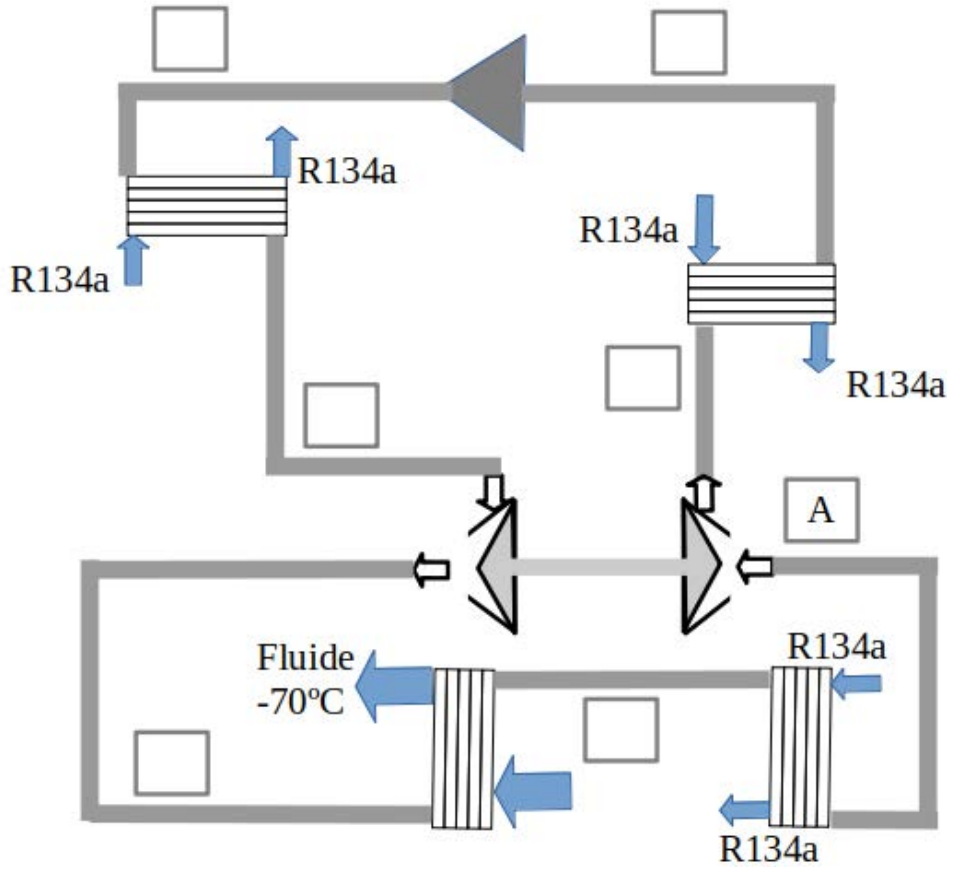
26. Quelle dépense supplémentaire faudrait-il compter pour calculer l'efficacité du cycle ?

27. Exprimer et calculer le transfert thermique massique reçu du R134a par l'air dans les trois échangeurs « R134a ». En déduire le transfert thermique total reçu par le R134a.

28. On considère une efficacité égale à 2 pour refroidir le fluide R134a par un système complémentaire afin de compenser les échanges avec l'air. Exprimer et calculer une nouvelle efficacité pour le système.

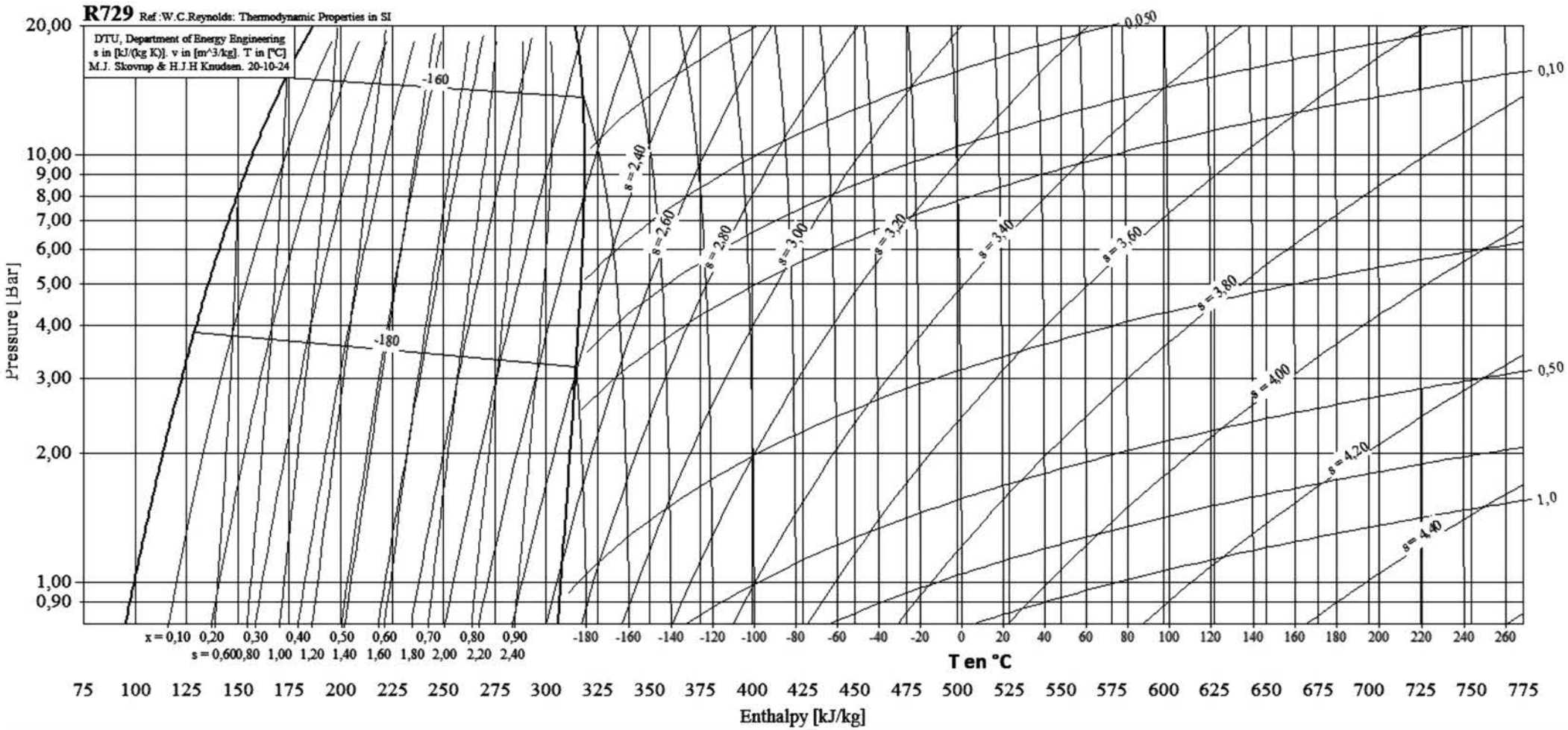
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Question 2



Question 4

États		Pression	Température	h(kJ.kg^{-1})
A	Entrée compresseur	1,0 bar	-20°C	
B	Entrée échangeur			
C	Entrée compresseur		-10°C	
D	Entrée échangeur	10 bar		
E	Entrée turbine	10 bar	-10°C	
F	Entrée échangeur	1,0 bar		
G	Entrée échangeur	1,0 bar	-75°C	


R729 Ref :W.C.Reynolds: Thermodynamic Properties in SI
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)]. v in [m^3/kg]. T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen. 20-10-24
Pressure [Bar]
20,00
10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,90
-160
-180
s = 2,40
s = 2,60
s = 2,80
s = 3,00
s = 3,20
s = 3,40
s = 3,60
s = 3,80
s = 4,00
s = 4,20
s = 4,40
0,050
0,10
0,50
1,0
x = 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70 0,80 0,90
s = 0,60 0,80 1,00 1,20 1,40 1,60 1,80 2,00 2,20 2,40
-180 -160 -140 -120 -100 -80 -60 -40 -20 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260
T en °C
75 100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500 525 550 575 600 625 650 675 700 725 750 775
Enthalpy [kJ/kg]