

Physique-chimie – DS 3

Le sujet comporte quatre parties indépendantes :

- I - Machines thermiques et principes de la thermodynamique (15% du barème).
- II - Chauffage d'une habitation (25% du barème).
- III - Étude d'un congélateur (30% du barème).
- IV - Autour du gaz naturel (30% du barème).

Elles peuvent être traitées dans un ordre quelconque.

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Instructions générales :

- Toutes les réponses devront être justifiées.
- Les copies illisibles ou mal présentées seront pénalisées.
- Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à attribution de points.
- Les diverses parties sont indépendantes et peuvent être traitées dans l'ordre choisi par le candidat. Il prendra toutefois soin de bien numéroter les questions, et de traiter les questions dans l'ordre au sein d'une même partie.

Donnée :

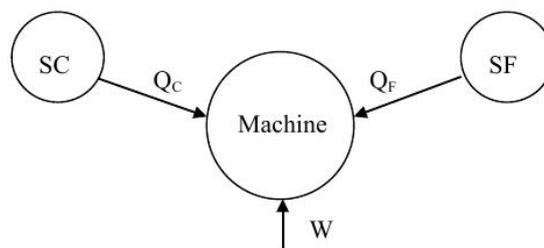
– Constante des gaz parfaits $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Introduction

Au quotidien, nous utilisons l'énergie sous différentes formes et avec différents appareils. Dans ce problème, nous allons nous intéresser au fonctionnement de machines motrices et réceptrices dont le rôle est de transformer une forme d'énergie en une autre, notamment mécanique et thermique, et bien sûr électrique. La machine thermique imaginée par Carnot en 1824 fonctionne, de façon cyclique, au contact de deux thermostats appelés aussi sources de chaleur dont la température est considérée comme constante. L'objectif de Carnot fut d'optimiser le rendement et l'efficacité de ces machines. Les notations utilisées sont les suivantes :

- W : transfert mécanique ou travail échangé entre la machine et l'extérieur.
- Q : transfert thermique ou chaleur échangée entre la machine et l'extérieur.
- S_C : source chaude à la température T_C . Elle échange la chaleur Q_C avec la machine.
- S_F : source froide à la température T_F . Elle échange la chaleur Q_F avec la machine.

Par convention $T_C > T_F$.



W , Q_C et Q_F seront donc positifs lorsque la machine reçoit de l'énergie et négatifs lorsqu'elle cède de l'énergie à l'extérieur.

I Machines thermiques et principes de la thermodynamique

- 1 - Préciser les signes de W , Q_C , Q_F pour le fonctionnement de trois types de machines : moteur (M), réfrigérateur (RF) et pompe à chaleur (PAC).
- 2 - Définir, en fonction de Q_C , Q_F et W , le rendement η du moteur, ainsi que les efficacités e_{RF} et e_{PAC} du réfrigérateur et de la pompe à chaleur.
- 3 -
 - a - Si l'évolution des machines est réversible, exprimer les relations données par les deux principes de la thermodynamique. On rappelle que chaque machine fonctionne de façon cyclique.
 - b - En déduire, dans cette évolution réversible, le rendement de Carnot η_C et les efficacités e_{RF} et e_{PAC} en fonction des températures.
- 4 - On suppose maintenant un fonctionnement irréversible du moteur. On note σ l'entropie créée.
 - a - Que devient l'expression du second principe écrite précédemment ?
 - b - Montrer que la nouvelle expression du rendement du moteur s'écrit : $\eta = \eta_C - \sigma T_F / Q_C$.
Ce rendement est-il plus grand ou plus petit que η_C ?
 - c - Au cours d'un cycle moteur, une masse donnée de gaz échange le travail $W = -15 \text{ kJ/cycle}$. Le degré d'irréversibilité, défini par $r = \eta / \eta_C$, vaut 0.94. On donne $T_C = 1450 \text{ K}$ et $T_F = 290 \text{ K}$.
Calculer les transferts thermiques Q_C et Q_F échangés au cours d'un cycle ainsi que la valeur de σ .

II Chauffage d'une habitation

On souhaite maintenir la température d'une habitation (H) à la température $T_H = 20^\circ\text{C}$, alors que la température de l'extérieur (E) est égale à $T_E = 0.0^\circ\text{C}$. Pour cela on doit fournir à la maison la puissance thermique $\Phi = 12\text{ kW}$ qui correspond aux pertes thermiques.

On propose dans cette partie de comparer différents procédés de chauffage.

5 - On chauffe directement la maison en utilisant du bois comme combustible. Déterminer la masse m_B de bois consommée par heure sachant que le pouvoir calorifique du bois est : $q_B = 18\text{ MJ/kg}$.

6 - On utilise maintenant une PAC fonctionnant réversiblement.

a - Calculer l'efficacité e_1 de la PAC.

b - En déduire la puissance électrique du moteur alimentant la PAC.

7 - On imagine maintenant que le bois est utilisé pour maintenir la température $T = 573\text{ K}$ d'un réservoir (R) qui sert de source chaude à un moteur dont la source froide est constituée par l'habitation (H).

Le travail fourni par le moteur est intégralement transformé en énergie électrique. Celle-ci sert à alimenter une PAC fonctionnant réversiblement entre (H) qui sert de source chaude et (E) qui sert de source froide.

Le schéma de fonctionnement est celui de la figure 1.

On note Q la quantité de chaleur fournie par le bois et transmise au moteur par l'intermédiaire du réservoir.

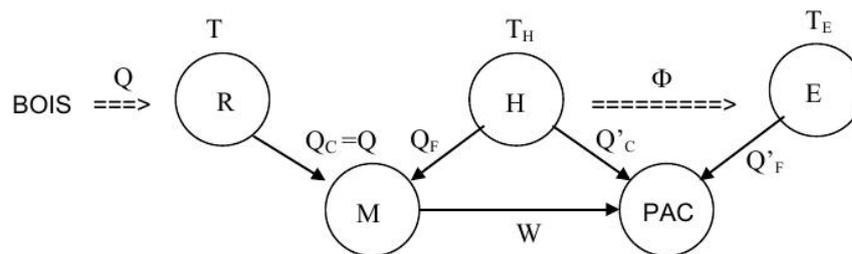


Figure 1

a - Préciser les signes de Q_C , Q'_C , Q_F , Q'_F et de W .

b - Exprimer, en fonction de Q et des températures, la chaleur Q_H reçue par l'habitation de la part des deux machines (M et PAC), qui fonctionnent de façon réversible.

c - En déduire la masse m'_B de bois consommée par heure. Comparer m'_B et m_B et commenter.

8 - Le fluide utilisé à l'intérieur de la PAC est de l'air, que l'on choisit de modéliser comme un gaz parfait, d'exposant adiabatique $\gamma = 1.4$ constant. On rappelle, dans le cadre de ce modèle, les expressions $C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}$ et $C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}$ des capacités thermiques à pression et volume constant.

On ne lui fait pas décrire un cycle de Carnot (deux isentropiques et deux isothermes), car les échanges thermiques effectués à l'aide d'isothermes sont extrêmement lents et requièrent des échangeurs thermiques de longueur quasi infinie. Les échanges thermiques isothermes ne sont donc pas utilisés en pratique.

On remplace donc les deux isothermes par deux échanges thermiques isobares. L'inconvénient est que pour un tel échange thermique, la température du gaz et du thermostat ne sont pas identiques, cette inhomogénéité de température induit donc une irréversibilité et conséquemment une baisse de rendement.

La suite de cette question cherche à exprimer cette baisse de rendement, en passant par un calcul de l'entropie créée.

Le cycle comporte deux isentropiques (AB et CD) et deux isobares (BC et DA).

a - Tracer l'allure du cycle dans un diagramme p en fonction de V . On indiquera le sens de parcours.

- b** - On donne $p_A = 10$ bars, $T_A = 293$ K, $p_C = 1.0$ bar, $T_C = 273$ K. Calculer T_B et T_D .
- c** - Sur quelle portion du cycle a lieu l'échange de chaleur avec la source chaude (donc avec l'intérieur de la maison) ? Et avec la source froide (donc l'extérieur) ?
- d** - On souhaite avoir l'expression de l'entropie créée lors de ces deux échanges thermiques. On suppose pour simplifier que chacun de ces échanges a lieu de la façon suivante : une quantité de matière n de gaz (système fermé) est isolée dans un compartiment et placée au contact d'un thermostat à T_0 (T_0 vaut ainsi soit la température de la source chaude lors de l'échange avec la source chaude, soit celle de la source froide lors de l'échange avec la source froide). Le gaz reçoit de la part de ce thermostat un transfert thermique Q lors d'une évolution isobare. Le gaz passe d'une température initiale notée T_i à la température finale égale à celle du thermostat. Donner l'expression du transfert thermique Q reçu par le gaz, puis de l'entropie créée S_c lors de cet échange thermique, en fonction de T_i , T_0 , n , R et γ . On donne pour cela l'expression suivante, pour un gaz parfait en évolution isobare passant d'une température T_1 à une température T_2 :
$$\Delta S = \frac{\gamma n R}{\gamma - 1} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$
- e** - Appliquer la question précédente pour donner l'expression puis la valeur de l'entropie créée par mole de gaz (S_c/n) lors de l'échange thermique de B vers C, puis pour celui de D vers A.
- f** - On admet qu'un raisonnement identique à celui de la question 4b, mais pour une pompe à chaleur, mène à l'expression suivante de l'efficacité :
$$e_2 = \frac{T_{s-c}}{T_{s-c} - T_{s-f} + T_{s-c} T_{s-f} \sigma / |Q_{s-c}|},$$
 avec T_{s-c} la température de la source chaude, T_{s-f} celle de la source froide, σ l'entropie créée au cours d'un cycle, et Q_{s-c} le transfert thermique reçu par la machine de la part de la source chaude lors d'un cycle. On admet également que Q_{s-c} est donné par $\frac{\gamma n R}{\gamma - 1} (T_{s-c} - T_D)$, avec n la quantité de matière impliquée lors d'un cycle. En déduire l'efficacité de la pompe à chaleur considérée ici. La comparer à e_1 .

III Étude d'un congélateur

On s'intéresse maintenant au fonctionnement d'un congélateur domestique placé dans une cuisine où la température ambiante $T_c = 298$ K est constante.

- 9** - Pour étudier les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du congélateur, on débranche ce dernier. La température intérieure initiale est $T_f = 268$ K. Au bout d'une durée $\Delta t = 6.0$ h, cette température passe à la valeur $T'_f = 273$ K.

La puissance reçue de l'extérieur est de la forme : $\Phi(t) = -aC[T(t) - T_c]$ où $T(t)$ est la température dans le congélateur à l'instant t , $C = 500$ kJ/K la capacité thermique du congélateur et a une constante. On pourra supposer que le congélateur et ce qu'il contient se comporte comme une phase condensée incompressible indilatable de capacité thermique C .

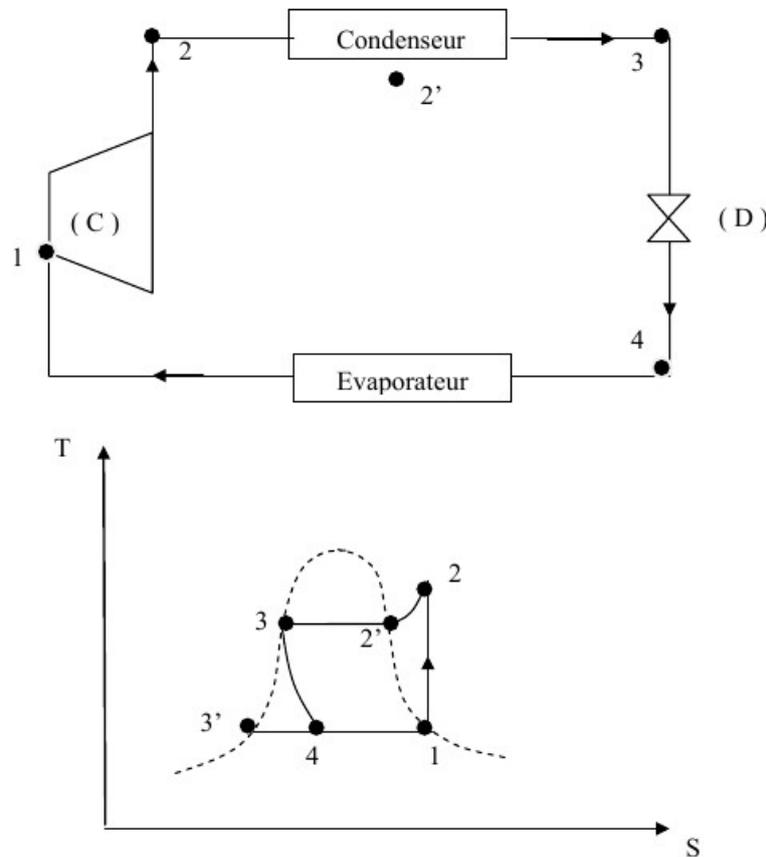
- a** - Préciser le signe et l'unité S.I. de la constante a .
- b** - Établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.
- c** - En déduire la loi $T(t)$.
- d** - Compte tenu de la valeur de T'_f , déterminer la valeur numérique de a .
- e** - Le congélateur a une efficacité $e = 3$.

Exprimer, en fonction de a , C , e , T_c et T_f , la puissance à fournir au moteur pour maintenir la température dans le congélateur constante et égale à T_f . La calculer.

Pour conserver les produits de la mer dans une chambre froide, un mareyeur utilise un congélateur qui fonctionne réversiblement avec de l'ammoniac.

La figure ci-dessous présente le cycle décrit ; la courbe correspondante est représentée en coordonnées (T, s) .

L'ammoniac est tantôt sous forme vapeur assimilée à un gaz parfait, tantôt sous forme liquide ; la courbe de saturation est représentée en pointillés.



Le compresseur (C), alimenté électriquement, aspire la vapeur sèche d'ammoniac dans l'état (1) et l'amène à l'état (2).

La vapeur passe par un état (2') dans le condenseur qui l'amène ensuite jusqu'à l'état (3), liquide saturant, puis elle subit une détente isenthalpique à travers le détendeur (D) jusqu'à l'état (4).

A l'état (4), le liquide est partiellement liquéfié et on note x le titre massique en vapeur.

Enfin, l'évaporateur ramène l'ammoniac à l'état de vapeur sèche.

Les transformations 2'3 et 41 sont isothermes et isobares. La transformation 22' est isobare.

On donne : $T_1 = 265 \text{ K}$, $T_3 = 300 \text{ K}$, $p_1 = 3.0 \text{ bars}$, $p_2 = 10 \text{ bars}$, $r = R/M = 489 \text{ S.I.}$ avec R la constante des gaz parfaits et M la masse molaire de l'ammoniac, et $\gamma = 1.3$ le coefficient adiabatique.

On rappelle que pour un gaz parfait la capacité thermique massique à volume constant s'écrit

$$c_v = \frac{r}{\gamma - 1},$$

et celle à pression constante $c_p = \gamma c_v$.

On négligera toute différence d'énergie cinétique ou d'altitude. Il n'y a pas de parties mobiles dans l'évaporateur ou le condenseur.

10 - a - Calculer T_2 .

b - Exprimer la variation d'enthalpie lors de la transformation 33'4 en fonction de x ; utiliser le caractère isenthalpique de la transformation 34 ; et en déduire la valeur de x .

On donne la capacité thermique massique de l'ammoniac liquide saturant : $c_L = 5.5 \text{ kJ/kg/K}$ et son enthalpie massique de vaporisation à 265 K sous 3.0 bars : $l_v = 1.3 \text{ MJ/kg}$.

c - On considère l'évaporateur. Exprimer la variation d'enthalpie massique h du fluide lors de l'évolution 41, en fonction de x et de l_v .

On admet la relation suivante, qui donne le transfert thermique massique q reçu par le fluide de la part du milieu extérieur au niveau de l'évaporateur : $q = \Delta h$.

- d** - On considère le compresseur. Exprimer la variation d'enthalpie massique h du fluide lors de l'évolution 41, en fonction de c_p , T_1 et T_2 .

On admet la relation suivante, qui donne le travail massique utile w reçu par le fluide de la part du compresseur : $w = \Delta h$.

- e** - En déduire l'efficacité de ce congélateur.

11 - *Une grande partie de cette question peut être traitée indépendamment du reste.*

Jusqu'ici, pour étudier le fonctionnement du congélateur nous avons supposé que l'ammoniac en phase vapeur se comporte comme un gaz parfait. Il s'agit d'une hypothèse qui nous a permis de faire les calculs et d'estimer en particulier T_2 et le titre en vapeur dans l'état 4 x_4 .

Nous allons maintenant déterminer ces deux grandeurs à l'aide du diagramme T - s expérimental disponible en dernière page du sujet (à rendre avec la copie), et voir à quel point si ces valeurs diffèrent de celles calculées dans le cadre du modèle du gaz parfait.

- a** - Quelle est l'équation des courbes isenthalpes pour un gaz parfait ?

Dans quelle partie du diagramme T - s de l'ammoniac (en fin de sujet) ceci commence-t-il à être vérifié ?

- b** - On suppose que le changement d'état $4 \rightarrow 1$ se fait toujours à $T_1 = 265 \text{ K}$ (-8°C), et que le point 1 est sur la courbe de rosée.

On suppose encore que l'évolution isobare $2 \rightarrow 3$ se termine en 3 sur la courbe d'ébullition à $T_3 = 300 \text{ K}$ (27°C).

Enfin, $3 \rightarrow 4$ est encore supposée isenthalpique, et $1 \rightarrow 2$ isentropique.

Avec ces informations, tracer le cycle suivi par le fluide dans le diagramme T - s fourni à la fin du sujet.

- c** - Déterminer graphiquement la température T_2 .

La comparer au résultat trouvé précédemment à l'aide du modèle du gaz parfait.

- d** - À l'aide de la règle des moments, déterminer graphiquement le titre x_4 en vapeur dans l'état 4. On détaillera la démarche.

Le comparer au résultat trouvé précédemment à l'aide du modèle du gaz parfait.

IV Autour du gaz naturel

Quelques problèmes liés au transport du gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement dans les roches poreuses du sous-sol et généré à partir de la sédimentation de matière organique vieille de plusieurs millions d'années. Utilisé comme source d'énergie, le gaz est composé principalement d'hydrocarbures : principalement du méthane (CH_4) mais aussi du propane (C_3H_8), du butane (C_4H_{10}), de l'éthane (C_2H_6) et du pentane (C_5H_{12}).

Environ 99% de la demande française de gaz naturel est satisfaite grâce aux importations, la Norvège étant le premier fournisseur de la France. Ainsi, la production française de gaz naturel représente environ 1% de la consommation, mais certains gisements restent inexploités.

Une liste de données numériques et un formulaire sont fournis à fin du sujet (page 7). Ces éléments sont suivis de quatre annexes.

I Découverte et transport par gazoduc de gaz naturel

I.A – Un gisement découvert !

Le 19 décembre 1951 à 8 heures du matin, l'équipe de forage ne découvre pas, sur le sondage Lacq 3, du pétrole, mais du gaz. Il jaillit d'un réservoir situé à 3,45 km de profondeur, à la très forte pression de $6,6 \times 10^2$ bar et à la température de 140 °C. Le débit est important, $150\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1}$. Il faudra cinq jours et quatre nuits aux spécialistes pour maîtriser l'éruption. Le trophée est de taille : Lacq s'avère un gisement de gaz naturel géant avec une réserve de quelque 262 milliards de mètres cubes de gaz naturel.

La composition molaire « principale » du gaz brut de Lacq était de 69,2% de méthane CH_4 , 15,2% d'hydrogène sulfuré H_2S , 9,6% de dioxyde de carbone CO_2 , 3,3% d'éthane C_2H_6 et 1,0% de propane C_3H_8 . Le tableau 1 donne certaines grandeurs physico-chimiques relatives aux différents constituants.

Formule brute	Masse molaire moléculaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	Température critique (°C)	Pression critique (bar)	Température au point triple (°C)	Pression au point triple (bar)
CH_4	16,0	-82,59	45,99	-182,46	0,117
H_2S	34,1	100,4	90,06	-85,45	0,232
CO_2	44,0	30,98	73,77	-56,56	5,187
C_2H_6	30,1	32,17	48,72	-182,78	0,0000113
C_3H_8	44,1	96,74	42,51	-187,62	$1,721 \times 10^{-9}$

Tableau 1 Quelques grandeurs physico-chimiques des principaux constituants du gaz de Lacq

I.A.1) Représenter le diagramme (P, T) d'un corps pur dans le cas général en y indiquant les différentes phases, les points particuliers avec leur signification.

I.A.2) Que dire de la densité du fluide présent dans ce réservoir ?

I.A.3) En réalité, le débit d'éjection des gaz diminue au cours du temps. Proposer une explication.

I.B – Transport par gazoduc

Pour répondre à certaines questions de cette sous-partie I.B, il sera nécessaire d'exploiter tout ou partie des documents des annexes 1, 2 et 3.

Posé en doublement de la première canalisation « artère des Hauts de France » et mis en service en 2016, le gazoduc cylindrique en acier de 191 km « artère des Hauts de France II » est découpé en deux tronçons :

- le premier, d'une longueur de 17 km, va de Loon-Plage (Nord) jusqu'à la station de Pitgam (Nord). Le gaz sur cette partie est acheminé dans un tuyau de diamètre intérieur $D_1 = 900$ mm sous une pression maximale $P_1 = 96$ bar (pression au départ) ;
- le second, d'une longueur de 174 km, va de la station de Pitgam jusqu'à la station située à Cuvilly (Oise). Le gaz est acheminé dans un tuyau d'un diamètre intérieur $D_2 = 1200$ mm sous une pression maximale $P_2 = 85$ bar (pression au départ).

La rugosité absolue des canalisations, qui correspond à la hauteur moyenne des aspérités des parois internes mesurée au palpeur, vaut $e = 5 \times 10^{-5}$ m.

Ce gazoduc achemine le gaz fourni par le terminal méthanier de Dunkerque et irrigue au passage des grandes agglomérations urbaines avec un débit volumique $Q_0 = 13 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ mesuré à $T_0 = 15^\circ\text{C}$ sous la pression $P_0 = 1,0 \text{ bar}$. Le gaz circule avec une vitesse moyenne $v = 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et de façon supposée isotherme à la température T_0 .

I.B.1) En supposant que le gaz circule dans les deux canalisations avec une vitesse moyenne de $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, calculer Q_1 , le débit volumique moyen de gaz dans la canalisation entre Loon-Plage et Pitgam et Q_2 , le débit volumique moyen dans la canalisation entre Pitgam et Cuvilly.

Le gaz véhiculé est du gaz naturel dont la composition est variable. Le maître d'ouvrage indique qu'il est composé essentiellement de méthane (entre 85 et 97%), d'éthane (entre 2 et 9%), d'hydrocarbures plus lourds et d'azote en faible quantité. Il contient également quelques traces de composés soufrés et un odorant. Pour simplifier, on considérera dans toute la suite que le gaz véhiculé a une composition molaire de 90% de méthane et 10% d'éthane. Quelques caractéristiques de ces deux composés sont indiquées dans le tableau 2.

Constituant	Méthane	Éthane
Masse molaire moléculaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	16,0	30,1
Température critique ($^\circ\text{C}$)	-82,59	32,17
Pression critique (bar)	45,99	48,72
Masse volumique critique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	162,7	206,2
Température au point triple ($^\circ\text{C}$)	-182,46	-182,78
Pression au point triple (bar)	0,117	0,0000113
Viscosité dynamique à 15°C sous 1,0 bar (Pa·s)	$1,1 \times 10^{-5}$	$9,1 \times 10^{-6}$
Masse volumique à 15°C sous 1,0 bar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0,67	1,28

Tableau 2 Quelques caractéristiques physico-chimiques du méthane et de l'éthane

I.B.2) Peut-on assimiler le gaz naturel acheminé dans « artère des Hauts de France II » à un gaz parfait ? On attend une réponse qualitative.

I.B.3) En utilisant l'annexe 1, montrer, en explicitant la démarche, que la masse volumique ρ_1 du gaz naturel à l'entrée du gazoduc à Loon-Plage est environ égale à $92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Justifier quantitativement qu'il n'est pas possible d'étudier l'écoulement du gaz naturel comme s'il était composé uniquement de méthane.

I.B.4) Déterminer également la masse volumique du gaz naturel ρ_0 à $T_0 = 15^\circ\text{C}$ sous pression atmosphérique $P_0 = 1,0 \text{ bar}$. Dans ces conditions, on assimilera le gaz à un gaz parfait.

I.B.5) Dans le gazoduc, il existe une perte de charge régulière. Expliquer ce que cela signifie.

Dans la suite du problème, les pertes de charge seront exprimées en pascal.

I.B.6) Si P_e et P_s désignent les pressions aux extrémités du gazoduc étudié de longueur L et de diamètre D , on admet que

$$P_e^2 - P_s^2 = \frac{16}{\pi^2} \rho_0 P_0 \lambda L \frac{Q_0^2}{D^5}$$

Dans cette formule, λ est « le coefficient de perte de charge » présenté notamment en annexe 3.

En utilisant les annexes 1 et 2, montrer, en explicitant la démarche, que la viscosité η du gaz naturel à la température de 15°C et sous une pression de l'ordre de 90 bar est environ égale à $1,4 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Estimer alors le nombre de Reynolds (présenté en annexe 3) relatif à l'écoulement et montrer que la pression du gaz en sortie de la première canalisation au niveau de la station de Pitgam est de l'ordre de 93 bar. Quelle est alors la perte de charge linéique dans cette canalisation ?

I.B.7) On admet que la pression de sortie (à Cuvilly) dans la canalisation menant le gaz naturel de Pitgam à Cuvilly est égale à 76 bar. Déterminer la perte de charge linéique associée. Quelle aurait été cette perte de charge linéique si cette canalisation avait pour diamètre 900 mm ? Commenter.

I.C – Injection de THT

I.C.1) À Pitgam, une faible quantité d'un composé soufré particulièrement odorant, le tétrahydrothiophène ou THT est injecté dans le gaz naturel provenant du terminal méthanier de Dunkerque ayant circulé dans l'« artère des Hauts de France II ». Pourquoi ?

I.C.2) Le THT est un composé cyclique de formule brute $\text{C}_4\text{H}_8\text{S}$. Représenter son schéma de Lewis sachant que les numéros atomiques des éléments carbone, hydrogène et oxygène sont respectivement 6, 1 et 8 et que l'élément soufre est situé juste sous l'élément oxygène dans la classification périodique.

II Liquéfaction du gaz naturel : production de GNL

Le 8 juillet 2016 le terminal méthanier de Dunkerque fut réellement mis en service avec l'arrivée du premier méthanier le *Madrid Spirit*, battant pavillon espagnol, en provenance du Nigéria, qui a déchargé 130 000 m³ de gaz naturel liquéfié (GNL). Ce terminal recevra ensuite le GNL de Norvège, premier importateur de gaz naturel en France.

Pour répondre à certaines questions de cette partie II, il sera nécessaire d'exploiter le diagramme de l'annexe 4.

II.A – Généralités

II.A.1) En exploitant le diagramme de l'annexe 4, montrer que pour condenser totalement du gaz naturel assimilé à du méthane gazeux pur à la pression de 1 bar, il faut se placer à une température d'environ -162 °C .

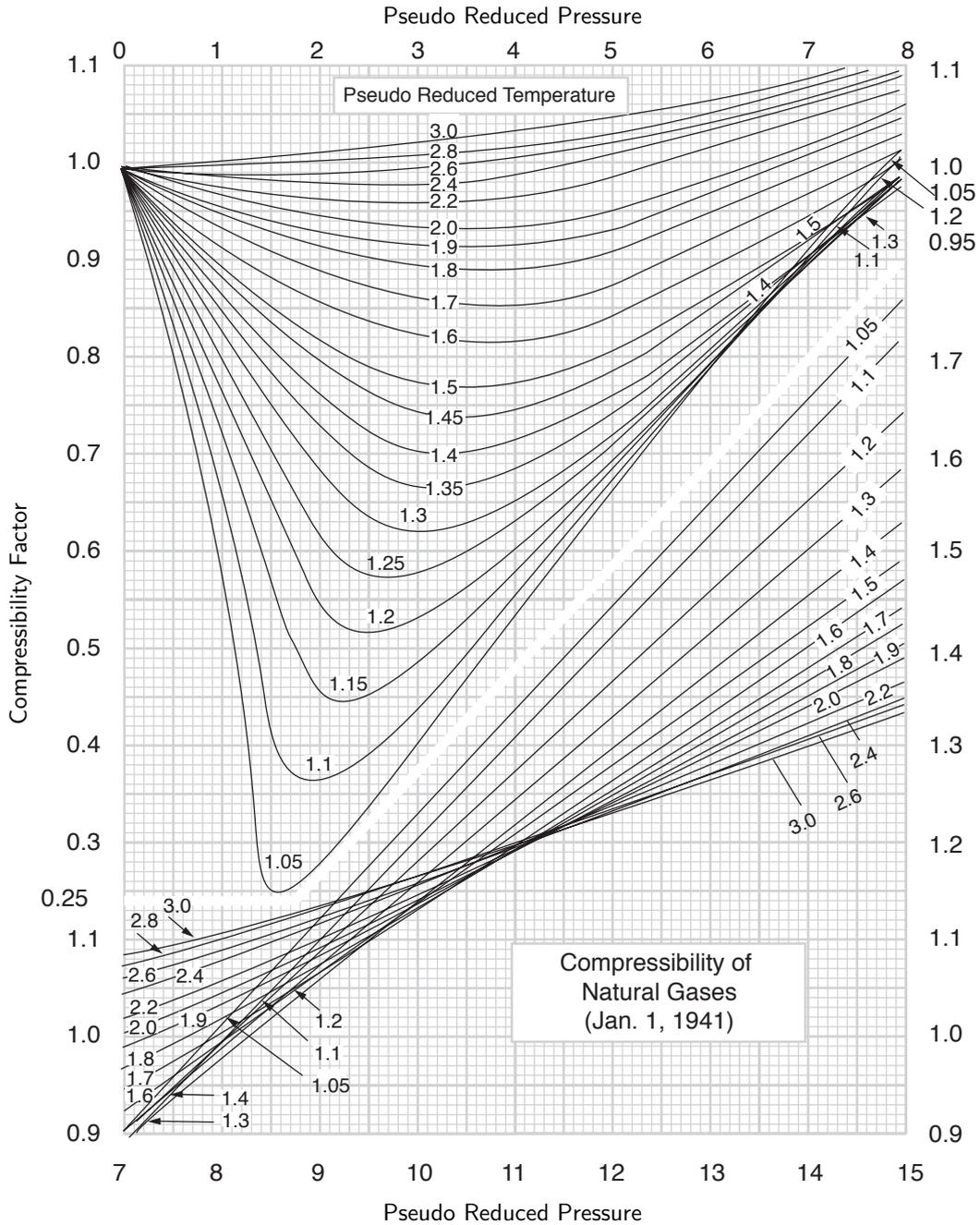
II.A.2) Quel est alors le volume massique du GNL ?

II.A.3) Expliquer en quoi le transport du gaz naturel sous forme GNL constitue une bonne alternative au transport par gazoducs ?

Annexes

Annexe 1 : Compressibilité d'un gaz naturel et abaque de Standing et Katz

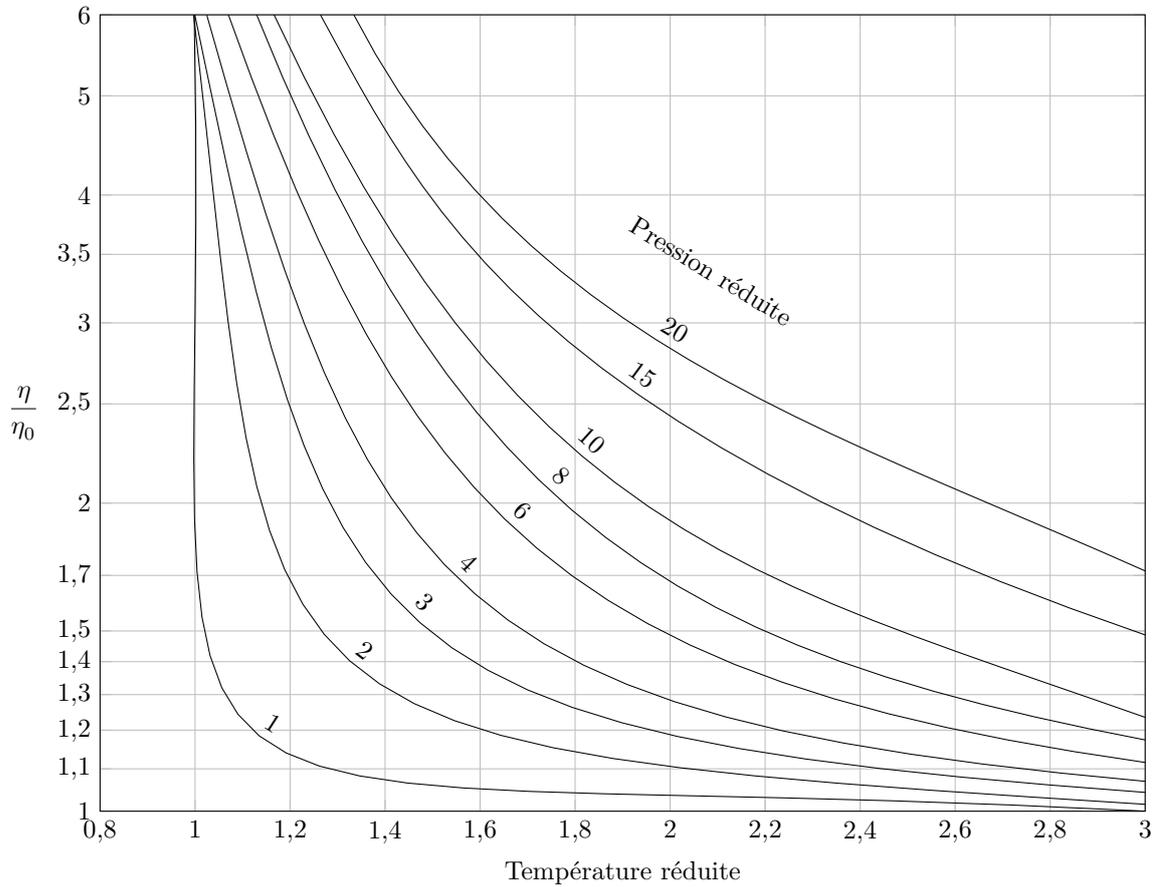
Les industriels comparent souvent l'état du gaz naturel à celui d'un gaz parfait : on admet que l'équation d'état du gaz naturel s'écrit $\rho = \frac{PM}{ZRT}$ où ρ désigne sa masse volumique (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), P sa pression (en Pa), M sa masse molaire (en $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$), Z sa compressibilité (sans dimension), R la constante des gaz parfaits et T sa température absolue (en K). La compressibilité d'un mélange gazeux à la température T et sous la pression P contenant plusieurs gaz i de fraction molaire respective y_i , de température critique T_{ci} et de pression critique P_{ci} peut se déterminer à l'aide de l'abaque de Standing et Katz où $P_{PR} = \frac{P}{\sum_i y_i P_{ci}}$ représente la pression pseudo-réduite et $T_{PR} = \frac{T}{\sum_i y_i T_{ci}}$ la température pseudo-réduite du mélange.



Annexe 2 : Viscosité d'un gaz naturel sous pression et abaque de Carr

On admet qu'à pression $P_0 = 1,0$ bar et $T_0 = 15$ °C, la viscosité dynamique d'un mélange gazeux peut être estimée à partir de celle des corps pur selon la relation $\eta_0 = \frac{\sum_i y_i \eta_{0i} M_i^{1/2}}{\sum_i y_i M_i^{1/2}}$. Dans cette formule, y_i , η_{0i} et M_i désignent respectivement la fraction molaire, la viscosité dynamique (à $P_0 = 1,0$ bar et $T_0 = 15$ °C) et la masse molaire du corps pur i présent dans le mélange.

On admet aussi que l'abaque de Carr ci-après permet d'obtenir la viscosité dynamique η d'un gaz naturel sous pression en fonction de sa pression réduite et de sa température réduite ; ces deux dernières grandeurs étant identiques respectivement à la pression pseudo-réduite P_{PR} et la température pseudo-réduite T_{PR} définies dans l'annexe 1.

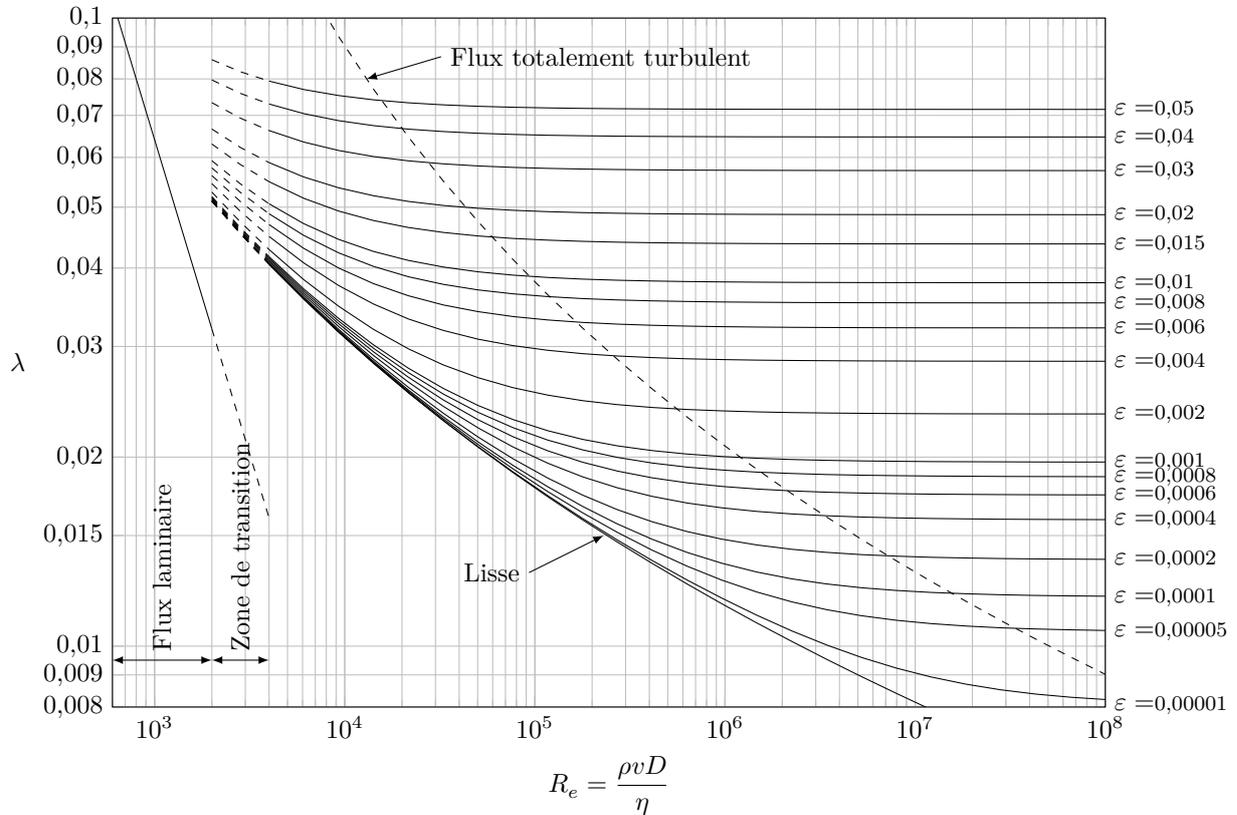


Annexe 3 : Coefficient de perte de charge et abaque de Moody

λ le coefficient de perte de charge, est relié :

- au nombre adimensionné de Reynolds $R_e = \frac{\rho v D}{\eta}$ caractérisant l'écoulement du fluide de masse volumique ρ , de viscosité dynamique η , à la vitesse v dans une conduite de diamètre D ;
- et à la rugosité relative adimensionnée de la paroi interne du gazoduc $\varepsilon = \frac{e}{D}$.

On détermine λ grâce à l'abaque de Moody ci-dessous.



Annexe 4 : Diagramme pression – enthalpie massique du corps pur méthane

