

DM 12 à rendre le vendredi 7/03/25

Quelques problèmes liés au transport du gaz naturel

Les deux parties sont indépendantes. La partie II sera traitée en entier et en priorité.
Le diagramme de l'annexe 4 est à rendre complété avec la copie.

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.

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 Cuville (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 $T_0 = 15 \text{ °C}$ 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 odorisant. 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 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$1,1 \times 10^{-5}$	$9,1 \times 10^{-6}$
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 $T_0 = 15 \text{ °C}$ sous pression atmosphérique $P_0 = 1,0 \text{ bar}$. Dans ces conditions, on assimilera le gaz à un gaz parfait.

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 $130\,000 \text{ m}^3$ 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 ?

II.B – Cycle de Linde de liquéfaction du méthane

On désire étudier le procédé de Linde de liquéfaction du méthane, utilisé par exemple dans l'usine de Snøhvit en Norvège, schématisé figure 1 avec les différents états du fluide numérotés de 0 à 10, permettant d'obtenir un débit massique D_{m10} de méthane liquide saturant à la pression $P_{10} = 1 \text{ bar}$ à une température $T_{10} = -161,7^\circ\text{C}$ (état 10).

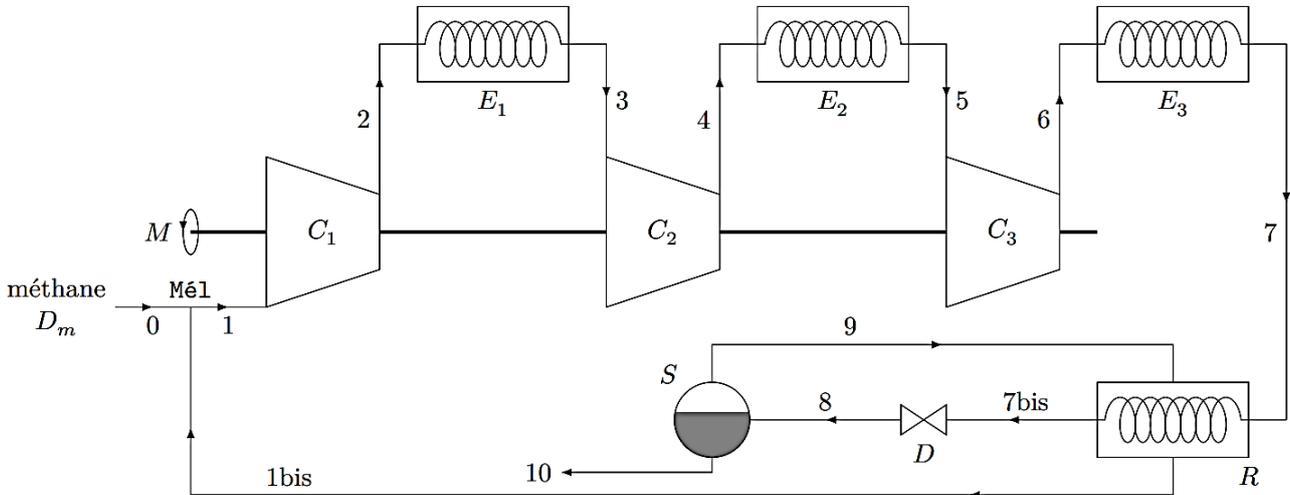


Figure 1 Installation de Linde de liquéfaction du méthane

Pour cela, on introduit un débit massique $D_m = 1,0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ de méthane gazeux à la température $T_0 = 7,0^\circ\text{C}$ et à la pression $P_0 = 1,0 \text{ bar}$ (état 0). Trois compresseurs C_1 , C_2 et C_3 fonctionnant de façon adiabatique et réversible, solidaires d'un même arbre entraîné sans perte par un moteur M , ainsi que trois échangeurs de chaleurs isobares (systèmes de refroidissement) E_1 , E_2 et E_3 permettent d'obtenir en l'état 7 du gaz à la pression $P_7 = 100 \text{ bar}$ et à la température $T_7 = -63^\circ\text{C}$. Les pressions intermédiaires sont égales à $P_2 = 5,0 \text{ bar}$ et $P_4 = 25 \text{ bar}$. L'enthalpie massique du fluide dans l'état 3 est $h_3 = 866 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et dans l'état 5, $h_5 = 840 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Un régénérateur R , échangeur thermique globalement calorifugé et fonctionnant de façon réversible, permet de refroidir le gaz comprimé non plus à -63°C mais à -82°C (état 7bis). Ce gaz refroidi est détendu isenthalpiquement de 100 bar à 1 bar par le détendeur D jusqu'à l'état diphasé 8 de titre massique en vapeur $x = 0,61$. Les phases liquide et gazeuse sont séparées dans le séparateur isobare S . La vapeur saturante sèche sortant du séparateur est recyclée dans le régénérateur R . Mē1 est un mélangeur globalement calorifugé, sans partie mobile et fonctionnant de façon isobare. La pression en 1 vaut donc $P_1 = 1 \text{ bar}$.

On se place en régime permanent d'écoulement. On négligera toute variation d'énergie mécanique du fluide.

Le débit massique de vapeur D_{m9} sortant du séparateur S est égal au débit D_{m1bis} de l'état 1bis.

II.B.1) On note respectivement les débits massiques de fluide D_{m1} et D_{m1bis} aux états 1 et 1bis. En utilisant le titre massique en vapeur x dans le séparateur, établir une relation entre D_{m1} , D_{m1bis} et x . Après avoir traduit la conservation du débit massique au niveau du mélangeur, déterminer les valeurs des débits massiques D_{m1} et D_{m1bis} .

II.B.2) Déterminer graphiquement les enthalpies massiques aux états 7 ($P_7 = 100 \text{ bar}$ et $T_7 = -63^\circ\text{C}$), 7bis ($P_{7bis} = P_7$, $T_{7bis} = -82^\circ\text{C}$) et 9 respectivement notées h_7 , h_{7bis} et h_9 . En effectuant un bilan énergétique au niveau du régénérateur R globalement calorifugé et ne comportant pas de partie mobile, déterminer l'enthalpie massique h_{1bis} .

On placera les points 7, 7bis et 9 sur le diagramme de l'annexe 4 à rendre avec la copie.

Indication pour le bilan énergétique au niveau du régénérateur R : appliquer le premier principe industriel aux deux flux de fluides : au système ouvert en écoulement entre 9 et 1bis et au système ouvert en écoulement entre 7 et 7bis.

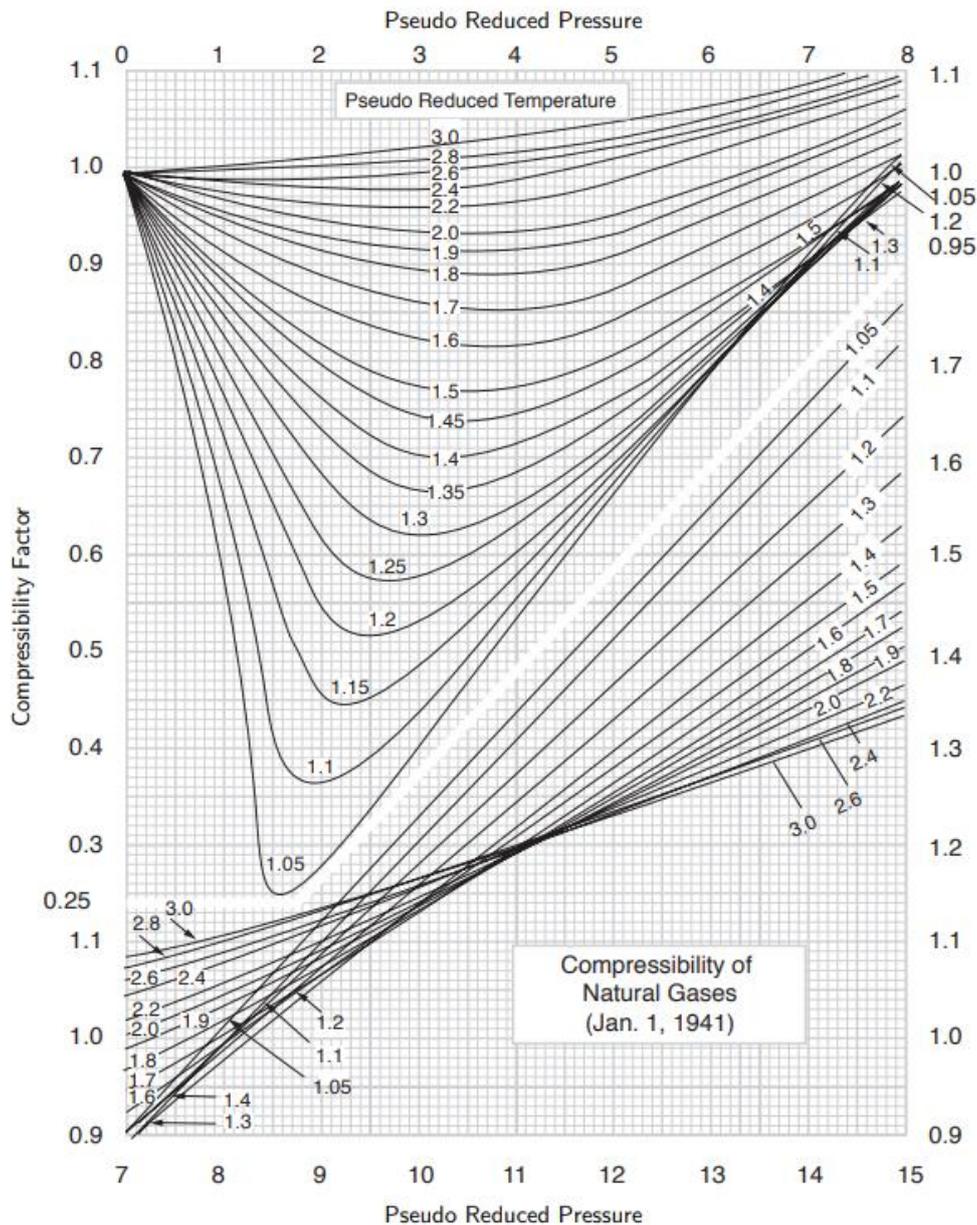
II.B.3) On admet qu'au niveau du mélangeur Mē1, il y a conservation du débit d'enthalpie ce qui se traduit par la relation $D_m h_0 + D_{m1bis} h_{1bis} = D_{m1} h_1$ où h_0 , h_1 et h_{1bis} désignent alors respectivement l'enthalpie massique du fluide dans l'état 0, 1 et 1bis. Calculer h_1 .

II.B.4) La transformation au niveau du compresseur C_1 étant supposée isentropique, déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique h_2 à l'état 2. En déduire la puissance P_{u1} fournie par le moteur au compresseur C_1 . On commencera par positionner le point 1 sur le diagramme.

On placera les points 1 et 2 et la transformation isentropique sur le diagramme de l'annexe 4 à rendre avec la copie.

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 4 : Diagramme pression – enthalpie massique du corps pur méthane

Annexe à rendre avec la copie

Nom :

