



# Thermodynamique industrielle

## Liquéfaction du gaz naturel

*adapté Centrale TSI 2017*

En plus du transport par gazoduc, l'approvisionnement en gaz naturel peut également se faire par bateau, ce qui permet de s'affranchir d'une infrastructure très lourde à construire. Pour transporter une masse élevée dans un volume restreint, le gaz naturel doit être liquéfié avant embarquement, puis regazéifié une fois débarqué avant d'être injecté sur le réseau de distribution domestique. La France compte trois terminaux permettant cette regazéification, à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), Montoir-de-Bretagne (Loire Atlantique) et Dunkerque (Nord). Cet exercice s'intéresse au fonctionnement d'un terminal de liquéfaction, tel qu'il se trouve dans le pays exportateur.

On étudie plus précisément le procédé de Linde de liquéfaction du méthane, utilisé par exemple dans l'usine de Snøhvit en Norvège, d'où provient la majorité du GNL importé en France. Un schéma de principe est représenté 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).

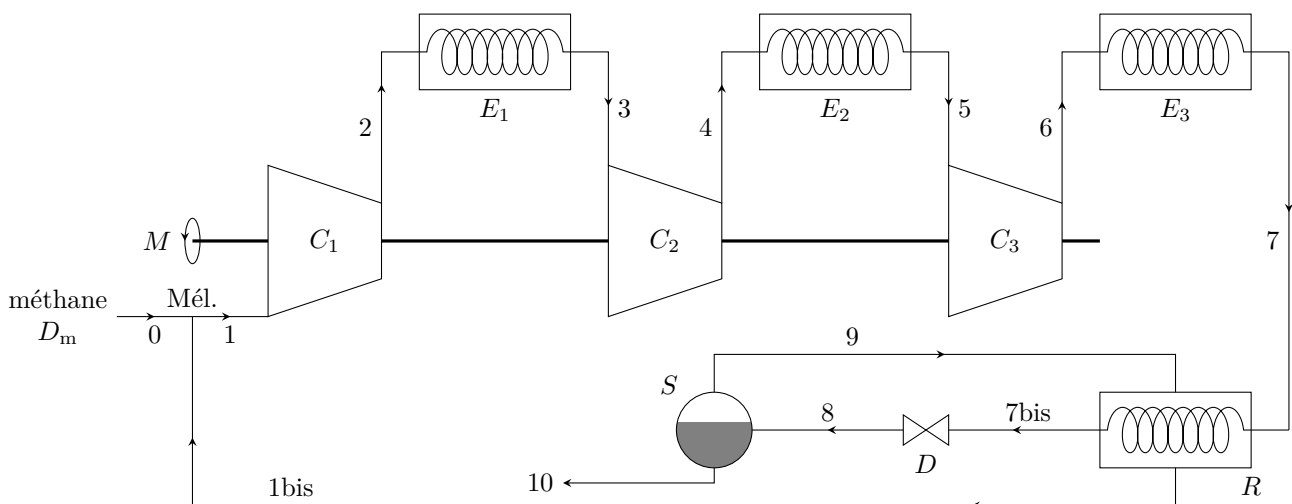


Figure 1 – Représentation par schéma bloc du procédé Linde.

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). Du gaz non liquéfié est réinjecté par un mélangeur globalement calorifugé, sans partie mobile et fonctionnant de façon isobare. La pression en 1 vaut donc  $P_1 = 1 \text{ bar}$ .

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,  $h_5 = 840 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

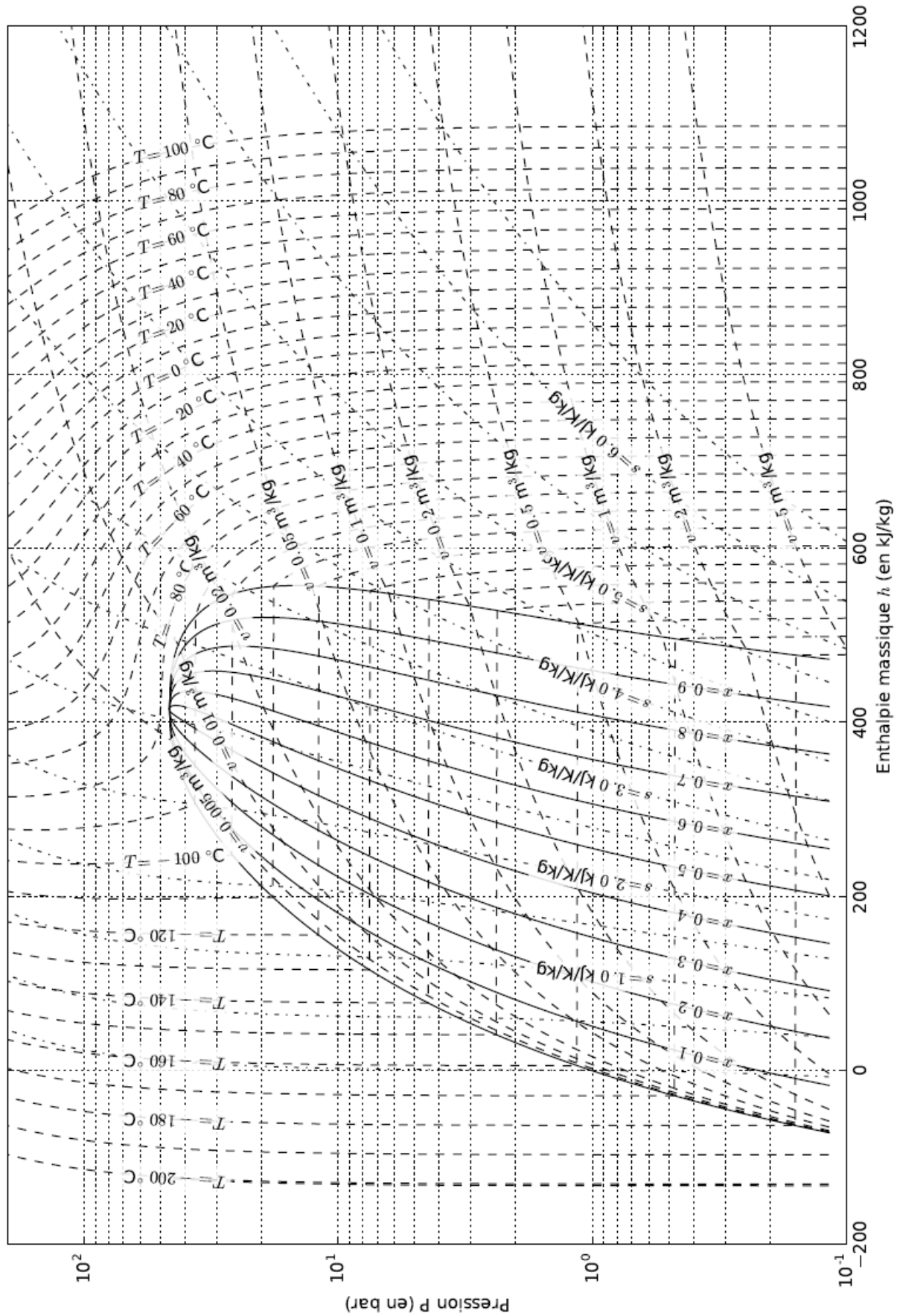
Un régénérateur  $R$ , échangeur thermique isobare globalement calorifugé et fonctionnant de façon réversible, permet de refroidir le gaz comprimé non plus à  $-63^\circ\text{C}$  mais à  $-82^\circ\text{C}$  (état 7bis). Ce gaz refroidi est détendu isenthalpiquement de 100 bar à 1 bar par le détendeur  $D$  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  $R$ , puis réinjectée au niveau du mélangeur.

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

1 - En exploitant le diagramme en annexe, 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  $-162^\circ\text{C}$ . Quel est alors le volume massique du GNL ?

- 2** - 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  $x$ . Déterminer les valeurs des débits massiques  $D_{m1}$  et  $D_{m1bis}$ .
- 3** - Déterminer graphiquement les enthalpies massiques aux états 7, 7bis et 9 respectivement notées  $h_7$ ,  $h_{7bis}$  et  $h_9$ .
- 4** - Établir le bilan énergétique global du régénérateur  $R$  globalement calorifugé. En déduire l'enthalpie massique  $h_{1bis}$ .
- 5** - Écrire le premier principe appliqué au mélangeur. En déduire  $h_1$  et placer le point 1 sur le diagramme.
- 6** - 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  $C_1$ .

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



**Éléments de correction**

1 Lecture graphique.  $v = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .

2 Par conservation du débit dans chaque composant, on a  $D_{\text{m1bis}} = D_{\text{m9}}$  et  $D_{\text{m8}} = D_{\text{m1}}$ . Au niveau du séparateur :  $D_{\text{m9}} = xD_{\text{m8}}$ . De plus,  $D_{\text{m}} + D_{\text{m1bis}} = D_{\text{m1}}$  d'où

$$D_{\text{m1}} = \frac{1}{1-x} D_{\text{m}} = 2,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad D_{\text{m1bis}} = \frac{x}{1-x} D_{\text{m}} = 1,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

3  $T$  et  $P$  donnés dans le texte pour 7 et 7bis. On les place et on lit

$$h_7 = 4,2 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{et} \quad h_{7\text{bis}} = 3,1 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On sait que le point 9 correspond à un état de vapeur saturante sèche sous 1 bar (sortie du séparateur isobare), et on lit sur la courbe de saturation

$$h_9 = 5,1 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

4 Échangeur double flux globalement calorifugé : c'est du cours ! En appliquant le premier principe aux deux flux avec un transfert thermique interne, puis en sommant, on arrive à

$$D_{\text{m1bis}}(h_{1\text{bis}} - h_9) + D_{\text{m1}}(h_7 - h_{7\text{bis}}) = 0$$

Il vient alors

$$h_{1\text{bis}} = \frac{D_{\text{m1}}}{D_{\text{m1bis}}}(h_7 - h_{7\text{bis}}) + h_9 = \frac{1}{x}(h_7 - h_{7\text{bis}}) + h_9 = 6,9 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}.$$

5 Premier principe avec deux entrées et une sortie :

$$D_{\text{m}}h_0 + D_{\text{m1bis}}h_{1\text{bis}} - D_{\text{m1}}h_1 = 0.$$

Pour calculer  $h_1$ , on a besoin de lire  $h_0 = 8,7 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et il vient

$$h_1 = 7,6 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

6 On suit l'isentrope. Lecture graphique :  $h_2 = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Premier principe au compresseur :

$$P_{\text{u1}} = D_{\text{m1}}(h_2 - h_1) = 0,62 \text{ MW}.$$