

DM 14 à rendre le 20/02/26

Dimensionnement d'une installation de liquéfaction

Dans ce problème, on se propose de dimensionner une installation de production en continu de diazote N₂ liquide, fonctionnant en régime permanent (procédé Linde). Le schéma de principe de l'installation est proposé sur la figure 1. Le problème débute par une description complète de l'installation ; les réponses aux questions exigent la prise en compte de *l'ensemble des données* décrivant l'installation ainsi que du diagramme enthalpique du diazote fourni en page 4.

Du diazote gazeux entre en continu dans la machine avec un débit massique D_m , dans les conditions $p_E = 1,00$ bar, $T_E = 300$ K. Il atteint un mélangeur (M) où on le mélange avec du diazote gazeux de débit D' dans les mêmes conditions p_E , T_E . En sortie du mélangeur (M), le débit massique de diazote gazeux est donc $D = D_m + D'$, toujours dans les conditions (p_E, T_E) .

Après passage par le mélangeur, le diazote traverse une série d'étages de compression ; chacun de ces étages est constitué d'un *compresseur adiabatique* (C) suivi d'un *réfrigérant isobare* (R) à circulation d'eau froide ; en sortie du réfrigérant, le diazote gazeux est ramené à une température de sortie égale à T_E . Dans le réfrigérant les seuls échanges thermiques se font entre l'eau froide et le diazote, il n'y a pas d'échanges avec le milieu extérieur.

Les N étages compresseur-réfrigérant sont identiques ; ainsi le rapport de compression $r = \frac{p_{sortie}}{p_{entrée}}$ est le même pour chacun des N compresseurs. Après la traversée du dispositif, le diazote atteint donc le point A à la pression $p_A = r^N p_E = 100$ bar et à la température $T_A = T_E$.

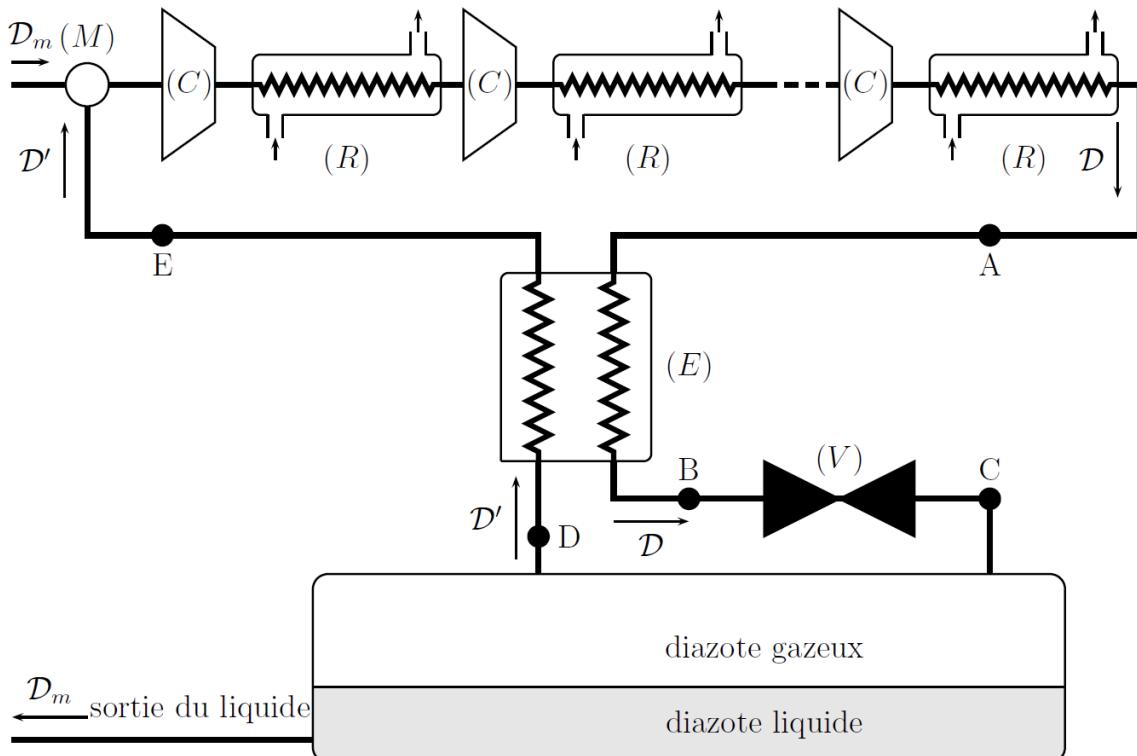


Figure 1 – Schéma de principe d'une installation de liquéfaction de diazote

L'eau liquide utilisée dans chacun des réfrigérants circule à la pression constante de 1,00 bar ; la température de l'eau à l'entrée du dispositif de refroidissement est $T_e = 280$ K. On note $c_e = 4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ la capacité thermique massique de l'eau liquide, considérée comme une constante.

Le diazote gazeux aborde entre A et B un échangeur thermique à contre-courant le long duquel il subit un refroidissement isobare ; à sa sortie, le fluide est dans l'état $p_B = p_A = 100 \text{ bar}$, T_B .

Ce refroidissement est suivi d'une détente isenthalpique dans une vanne de détente (V).

A la sortie du robinet, le diazote est au point C : c'est un mélange liquide-vapeur dont la fraction massique de liquide est notée x , à la pression atmosphérique $p_C = p_E = 1 \text{ bar}$, et à la température $T_C = T_{eb}(p_C) = 77 \text{ K}$. A cette température, la densité du diazote liquide est $d = 0,81$.

La fraction massique x de diazote liquéfié est faible, on extrait seulement du réservoir un débit massique modeste D_m de diazote liquide dans les conditions (p_C, T_C) ; le diazote gazeux recyclé est renvoyé, avec un débit massique D' , vers l'échangeur (E). (*Il n'y a pas de changement d'état dans le réservoir*).

Ce courant du diazote gazeux entre dans (E) aux conditions $p_D = 1,00 \text{ bar}$, $T_D = 77 \text{ K}$.

Dans l'échangeur (*adiabatique*) (E), le diazote se réchauffe à pression constante et arrive au point E dans les conditions $p_E = 1,00 \text{ bar}$, $T_E = 300 \text{ K}$, avant d'être renvoyé vers le mélangeur.

Pour des raisons techniques, on impose deux limites de fonctionnement :

- la température du diazote ne doit, en aucun point du dispositif, dépasser $T_{max} = 400 \text{ K}$;
- la température de l'eau de refroidissement ne doit pas dépasser $T'_{max} = 350 \text{ K}$ en sortie des réfrigérants (R).

Le diazote gazeux est diatomique, sa masse molaire vaut $M = 28,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$. On notera h_K son enthalpie massique en un point K du schéma de la figure 1.

La constante molaire des gaz parfaits est $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

A. - Dimensionnement des étages de compression

Dans cette seule partie A le diazote est assimilé à un gaz parfait.

1 - On donne le rapport $\gamma = C_p/C_v$ des capacités thermiques d'un gaz parfait diatomique : $\gamma = \frac{7}{5}$.

En déduire les expressions des capacités thermiques molaires à volume et à pression constante du diazote en fonction de R. (*Question modifiée car thermodynamique statistique pas encore traitée*).

2 - On admet que les compresseurs fonctionnent de manière réversible. Déterminer et calculer la valeur minimale de N compatible avec les exigences décrites ci-dessus. On adoptera cette valeur dans la suite. Calculer numériquement r et T_{sortie} dans ce cas.

3 - On note D_{eau} le débit massique du courant d'eau liquide circulant dans chaque réfrigérant (R). Déterminer l'expression et calculer la valeur minimale du rapport D_{eau} / D compatible avec les exigences ci-dessus. (*Enoncer le premier principe pour un écoulement stationnaire puis l'appliquer aux deux fluides situés dans un réfrigérant (R)*).

B. - Diagramme enthalpique du diazote

Dans cette partie B et la suivante C, le diazote n'est plus assimilé à un gaz parfait. La figure 5 fournie en page 4, représente le diagramme enthalpique du diazote sous la forme d'un réseau de courbes.

4 - Identifier la grandeur conservée le long de la courbe \mathcal{C}_1 . En justifiant votre réponse, déterminer l'asymptote de cette courbe à basse pression.

5 - Identifier la grandeur conservée le long de la courbe \mathcal{C}_2 . Justifier le sens de variation de cette courbe.

6 - Identifier et nommer les états possibles du diazote sur la courbe \mathcal{C}_3 .

7 - Identifier la grandeur conservée le long de la courbe \mathcal{O}_4 . On considère la transformation amenant le diazote de l'état représenté par le point M_1 à celui représenté par le point M_2 suivant le segment $[M_1M_2]$. Décrire l'état du diazote en M (sa composition).

C. - Dimensionnement de l'échangeur (E)

8 - Exprimer h_C en fonction de x et des enthalpies massiques du diazote liquide et gazeux, notées h_{liq} et h_{vap} , dans le réservoir.

9 - Le réservoir utilisé en sortie de l'appareil fonctionne aussi en régime permanent ; relier x , D et D_m puis x , D' et D .

10 - Par un bilan que l'on précisera pour le fonctionnement de (E), déterminer x en fonction de h_A , h_E et h_{liq} .

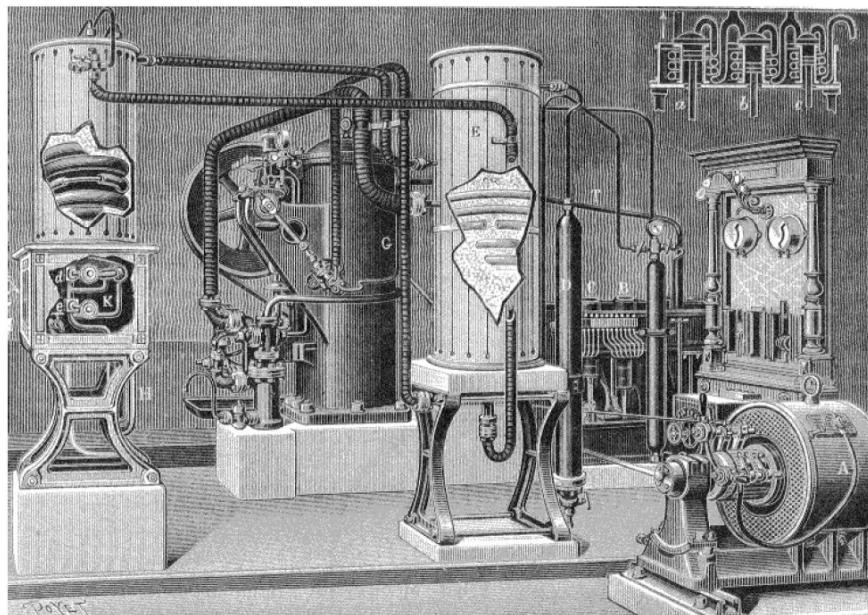
11 - En exploitant le diagramme enthalpique du diazote fourni en annexe, déterminer les valeurs de h_A , h_E , h_{liq} et h_{vap} . Evaluer x avec 2 chiffres significatifs. Quelle valeur aurait-on obtenue en considérant que le diazote gazeux vérifie la loi des gaz parfaits ?

12 - Reproduire sommairement le diagramme enthalpique du diazote en y faisant figurer la courbe \mathcal{O}_3 et l'isobare à la pression du point B du dispositif. En déduire la valeur de la température et l'état du diazote en ce point B (en expliquant le tracé réalisé pour placer B).

13 - La production de diazote liquide s'effectue avec un débit $D_m = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$. Dans le cadre du modèle du gaz parfait, évaluer la puissance mécanique qui est nécessaire au fonctionnement de l'ensemble des N compresseurs (C).

Comparer votre résultat à la citation suivante, publiée lors de l'exposition universelle de 1900 :

Nous avons immédiatement décrit le principe de l'appareil de M. le Dr. Carl Linde ; quelques mois plus tard, M. le Dr. d'Arsonval faisait installer dans son laboratoire du Collège de France une petite machine de 3 chevaux destinée à fournir un litre d'air liquide par heure. L'illustration ci-dessous accompagnait l'article cité.



On notera que $3,0 \text{ hp} \simeq 2,2 \text{ kW}$; hp est le symbole de l'unité « cheval-vapeur ».

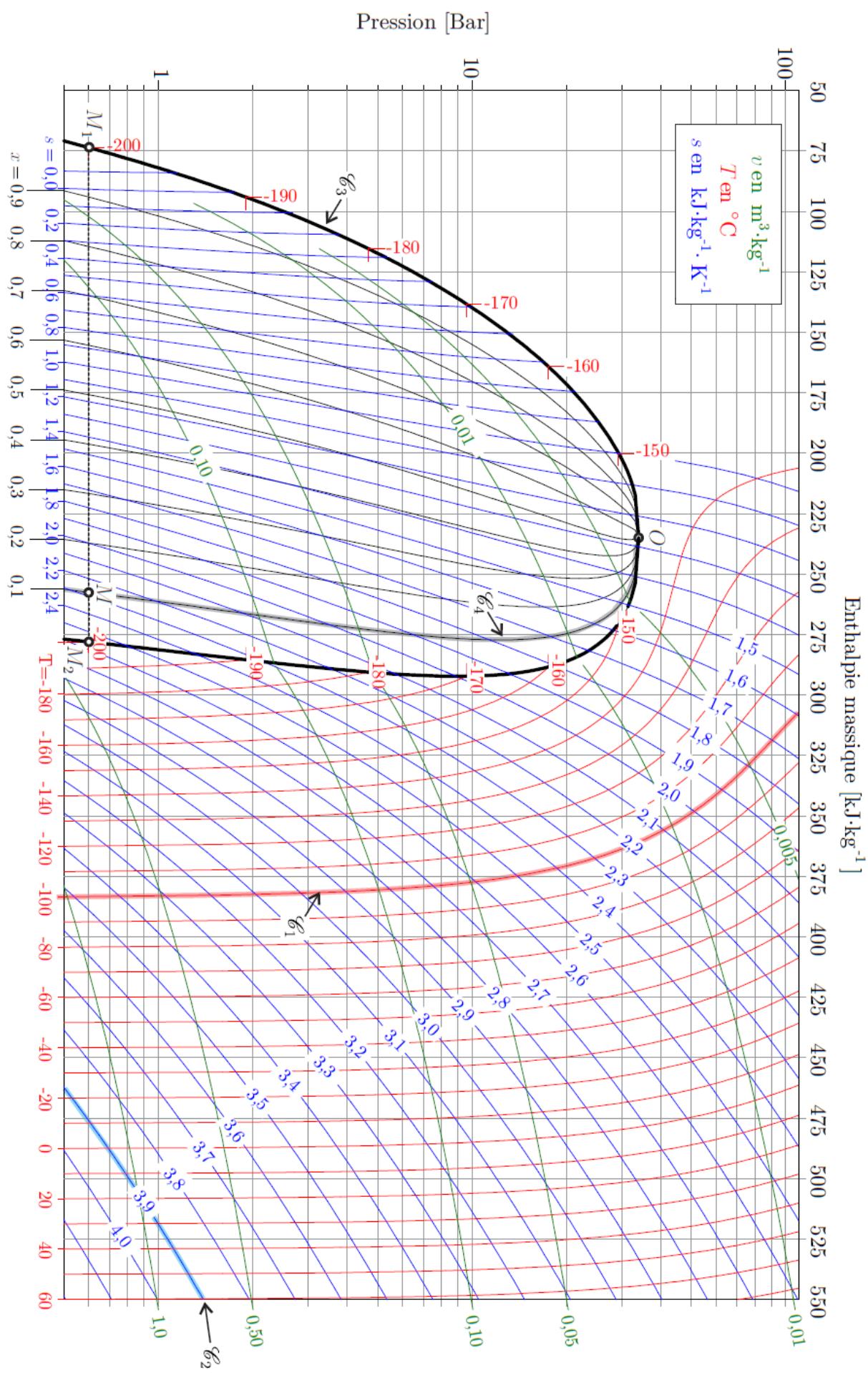


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote