PSI - PSI* 2022 - 2023

DM Physique N°2 - pour le 06/10

I. Mines-Ponts 2015 – Extrait

Dans ce problème, on se propose de dimensionner une installation de production en continu de diazote N_2 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 annexe.

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 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.

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 $T_A = T_E$.

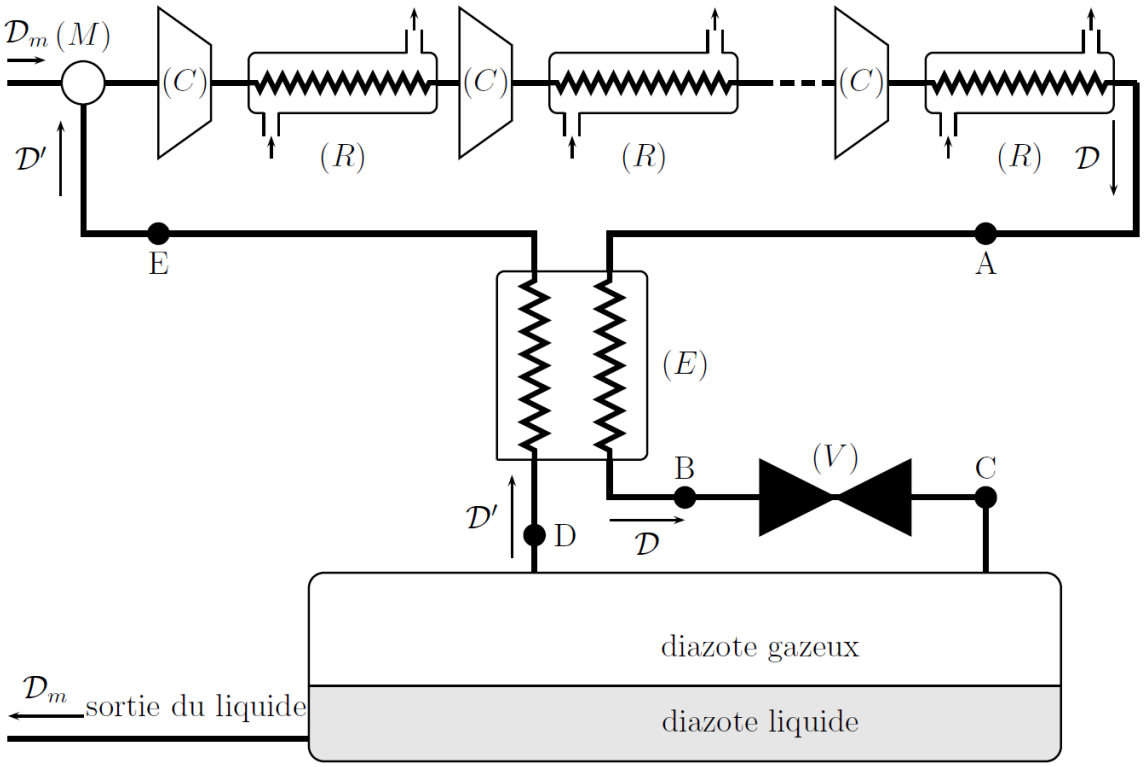


Figure 1 – Schéma de principe d'une installation de liquéfaction de diazote

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 kJ.kg^{-1}.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 $p_B = p_A$, 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 $p_C = p_E$, et à la température $T_C = T_{éb}(p_C) = 77$ 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). Ce courant du diazote gazeux entre dans (E) aux conditions p_D = 1,00 bar, T_D = 77 K.

Dans l'échangeur (E), le diazote se réchauffe à pression constante et arrive au point E dans les conditions p_E = 1,00 bar, T_E = 300 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 K ;

— la température de l'eau de refroidissement ne doit pas dépasser T'_{max} = 350 K en sortie des réfrigérants (R).

Le diazote gazeux est diatomique, sa masse molaire vaut M = 28,0.10^{-3} kg.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 J.K^{-1}.mol^{-1}.

A.) Dimensionnement des étages de compression

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

1) Que vaut le rapport $\gamma = C_p/C_v$ des capacités thermiques du diazote ? 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. Donner r et T_{sortie} dans ce cas.

2) 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.

B.) Diagramme enthalpique du diazote

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

3) Identifier la grandeur conservée le long de la courbe $\mathscr{C}_1$. En justifiant votre réponse, déterminer l'asymptote de cette courbe à basse pression.

4) Identifier la grandeur conservée le long de la courbe $\mathscr{C}_2$. Justifier le sens de variation de cette courbe.

5) Identifier et nommer les états possibles du diazote sur la courbe $\mathscr{C}_3$.

6) Identifier la grandeur conservée le long de la courbe $\mathscr{C}_4$. 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.

C.) Dimensionnement de l'échangeur (E)

7) 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.

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

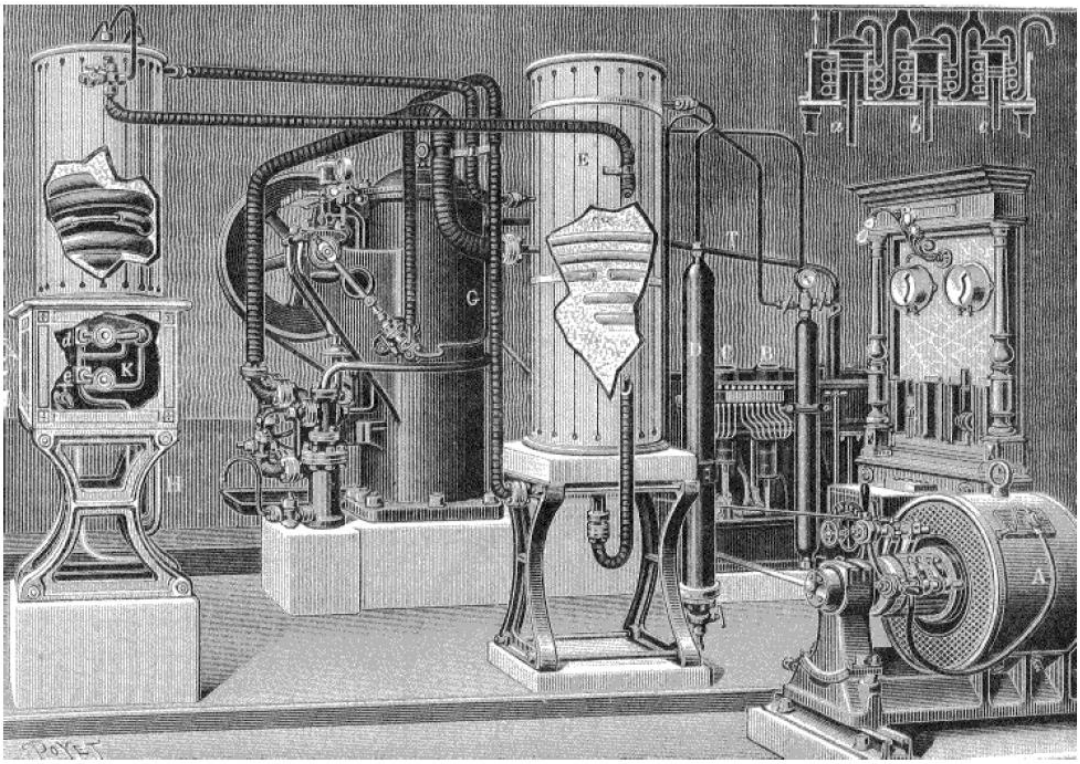
9) Par un bilan que l'on précisera pour le fonctionnement de (E), déterminer x en fonction de h_A, h_E et h_{liq}.

10) 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 ?

11) Reproduire sommairement le diagramme enthalpique du diazote en y faisant figurer la courbe $\mathscr{C}_3$ 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.

12) La production de diazote liquide s'effectue avec un débit $D_m = 3{,}0.10^{-2}\text{kg.s}^{-1}$. 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 hp≃2,2 kW ; hp est le symbole de l'unité « cheval-vapeur ».



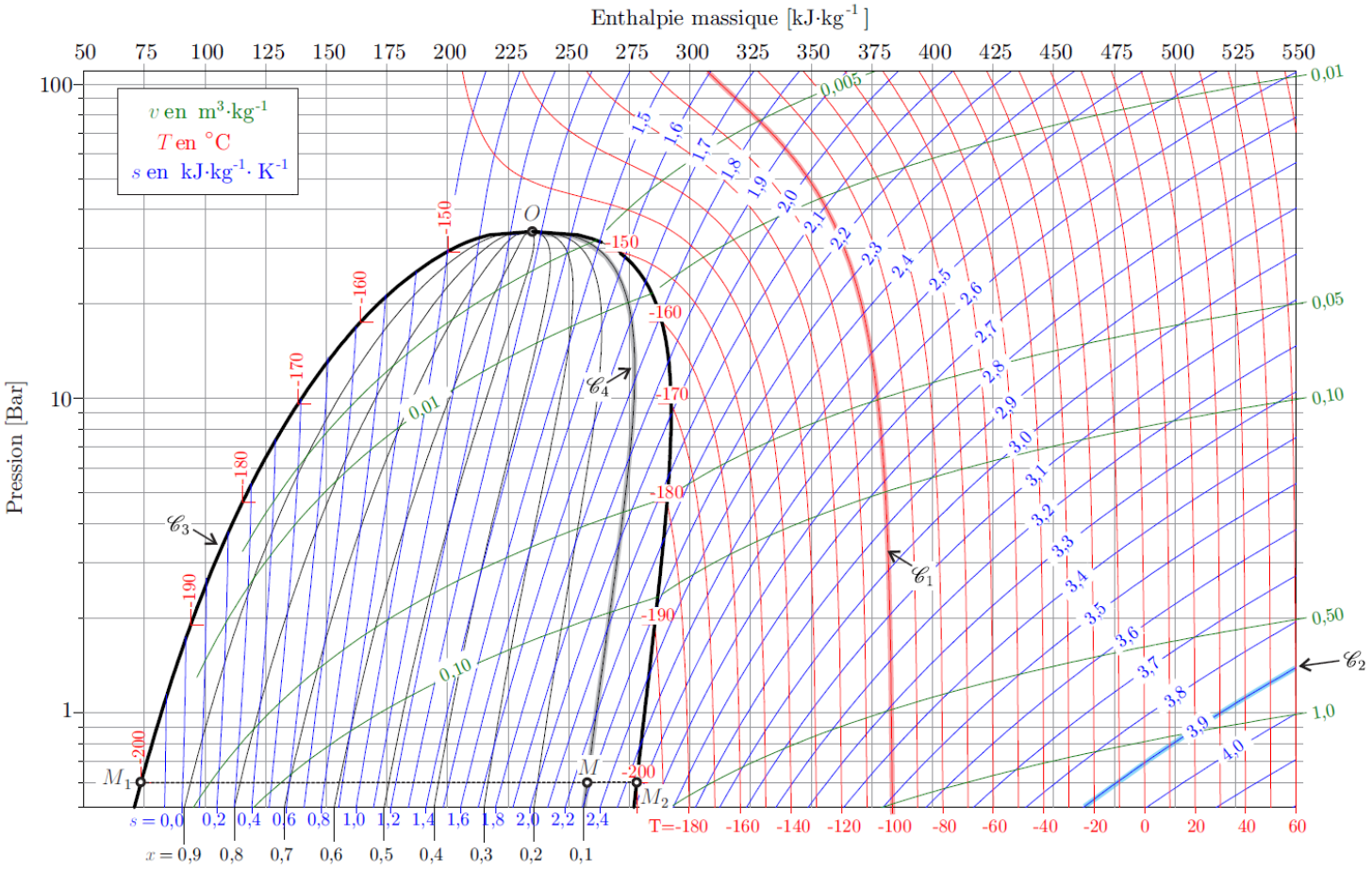


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote

II. Mines-Ponts 2016 – Extrait

Simulation de la marche d'un piéton

L'action de la marche d'un piéton est caractérisée par un contact continu sur la surface du sol puisque le second pied touche le sol avant que le premier ne le quitte. La modélisation en est donnée ci-dessous :

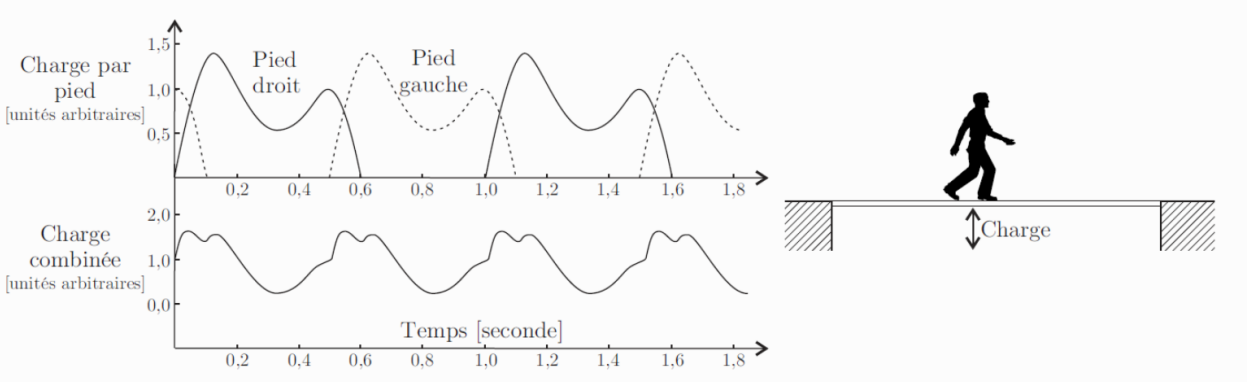


FIGURE 2 – Forçage d'une passerelle par la marche d'un piéton.

Afin d'étudier précisément les propriétés du forçage que constitue la marche d'un piéton, on réalise l'acquisition en laboratoire du signal correspondant à cette sollicitation.

L'acquisition est effectuée sur des durées allant de quelques secondes à quelques minutes. Les signaux ainsi obtenus sont similaires mais pas parfaitement identiques. Chacun de ces signaux présente les caractéristiques essentielles du signal de la charge combinée représentée sur la figure 2. On calcule alors le spectre de ces signaux en les échantillonnant en $N = 300$ points équidistants sur un intervalle $[t_{\min}, t_{\max}]$. Les différents spectres obtenus sont rassemblés sur la figure 4.

❏ **1 -** Analyser et interpréter aussi précisément que possible ces différents spectres. Sont-ils tous exploitables ? Lequel vous paraît le plus pertinent ? En déduire la (ou les) fréquence(s) caractéristique(s) de la marche étudiée. Etait-ce qualitativement prévisible ?

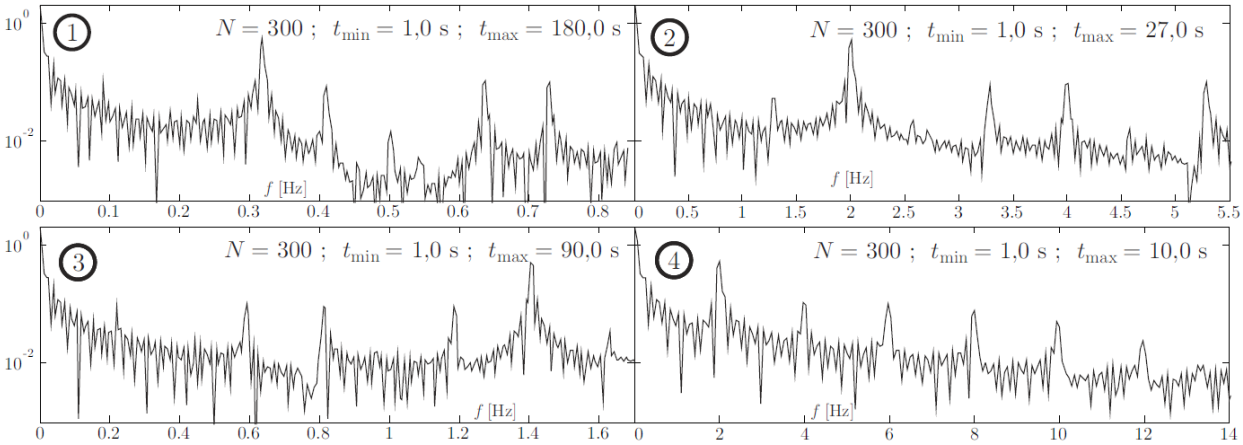


FIGURE 4 – Spectres des signaux correspondants à la marche d'un piéton

Pour marquer le millénaire, une nouvelle passerelle a été construite au dessus de la Tamise à Londres pour un coût total de plus de 20 millions de Livres Sterling. Quand elle fut ouverte aux piétons on remarqua très vite qu'elle se balançait latéralement et verticalement en cas de forte affluence. Avec un grand nombre de piétons, son mouvement oblique était tel que la plupart d'entre eux s'arrêtaient et s'accrochaient aux rampes. Des images et des vidéos ont montré que ces mouvements latéraux pouvaient avoir une amplitude moyenne de 75 mm et qu'ils se produisaient avec des fréquences de l'ordre du hertz. Le pont fut donc fermé deux jours après son ouverture au public. Dix-huit mois de recherches furent nécessaire pour résoudre le problème et faire les modifications préconisées

❏ 2 - A partir de l'étude du 1-, expliquer le problème rencontré lors de l'inauguration du Millénium bridge.