

DS SCIENCES PHYSIQUES MATHSPÉ

calculatrice: autorisée

durée: 2 heures

Sujet

Production de l'azote liquide.....	1
($\frac{1}{2}$ E3A MP 2006 non modifié).....	1

Production de l'azote liquide ($\frac{1}{2}$ E3A MP 2006 non modifié)

Le problème est consacré à la production de l'azote liquide par le procédé CLAUDE.

CHAÎNE DE PRODUCTION DE L'AZOTE LIQUIDE

En 1902, l'ingénieur Georges Claude a mis au point un procédé qui porte son nom et dont les brevets furent à l'origine de la création de l'entreprise Air Liquide. Nous proposons ici d'en étudier les caractéristiques principales.

Les grandeurs pertinentes pour une telle étude sont les débits massiques des fluides concernés et leur enthalpie massique.

A. Les différents éléments d'une chaîne de production

Une chaîne de production industrielle comporte de nombreux éléments permettant de modifier l'état des fluides qui y circulent, chaque élément fonctionnant en régime permanent.

Sur une durée Δt , chacun de ces éléments est traversé par un certain volume de fluide. Les grandeurs « entrantes » dans un élément particulier seront notées par un indice « e » (masse m_e , enthalpie H_e) et les grandeurs « sortantes » de ce même élément par un indice « s » (masse m_s , enthalpie H_s), sur cet intervalle de temps.

1. Conservation de la masse

L'étude dynamique de la production impose le recours au débit massique des fluides traités afin d'accéder au taux horaire de production d'azote liquide. Ce débit massique est mesuré en kg.h^{-1} et systématiquement représenté par le symbole D . Si une masse δm de fluide traverse la section S d'une canalisation pendant la durée dt , le débit massique de ce fluide se définit par $D = \frac{\delta m}{dt}$.

Un élément X de la chaîne peut être alimenté par une ou plusieurs tubulures, caractérisées par différents débits ; il peut à son tour renvoyer le fluide dans différentes directions. Un tel élément sera symboliquement représenté par :

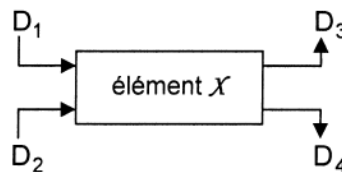


Figure 1

A1. En identifiant le débit entrant D_e et le débit sortant D_s , écrire la relation qui existe entre les différents débits lorsque l'élément fonctionne en régime permanent.

2. Bilan enthalpique

Un fluide en écoulement avec une énergie cinétique négligeable passe d'un milieu où la pression est P_e , à un milieu où la pression est P_s . Ce transfert s'effectue soit sous l'effet du simple écoulement du fluide (dans ce cas $P_e = P_s$), soit sous l'effet d'un dispositif compresseur ou détendeur (dont l'étude particulière ne sera pas menée ici). Au cours du passage dans cet éventuel dispositif (élément T), il reçoit, en plus du travail des pressions P_e et P_s , un travail \dot{W} et une chaleur \dot{Q} par unité de temps (figure 2).

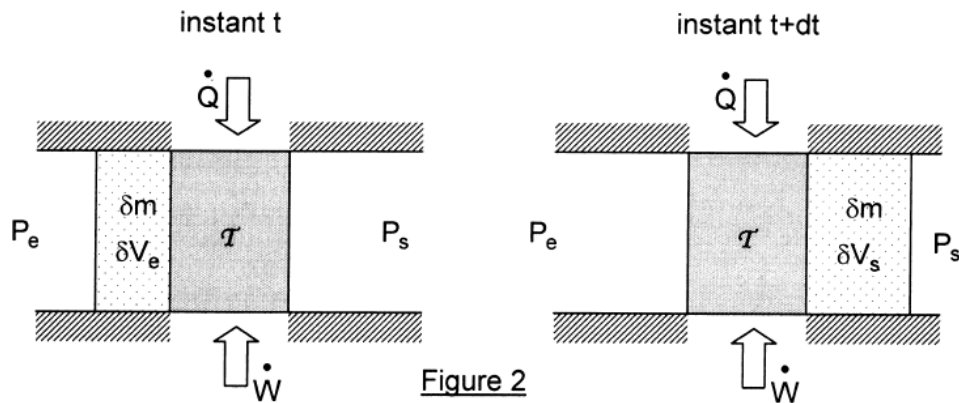


Figure 2

La canalisation de section S est isolée thermiquement et le fluide ne peut échanger de chaleur que lorsqu'il se trouve dans \mathcal{T} .

A2*a. Quelle est l'unité des grandeurs \dot{W} et \dot{Q} ?

Considérons le transfert d'une masse δm de fluide à travers le dispositif pendant dt . Avant le passage, l'état du fluide est caractérisé par sa pression P_e , sa température T_e , son volume δV_e , son énergie interne δU_e et son enthalpie δH_e . Après son passage ces grandeurs sont devenues respectivement P_s , T_s , δV_s , δU_s et δH_s .

A2*b. En considérant que le volume du fluide passe de δV_e à 0 sous l'effet de P_e et de 0 à δV_s sous l'effet de P_s , déterminer le travail δW_p des forces de pression lors de la transformation de la masse δm ?

A2*c. Que valent le travail total δW et la chaleur totale δQ fournis au fluide par le dispositif entre t et $t+dt$?

A2*d. En appliquant le premier principe de la thermodynamique, trouver une relation entre \dot{W} , \dot{Q} , P_e , δV_e , δU_e , P_s , δV_s , δU_s et dt .

A2*e. Que vaut l'enthalpie δH_e de cette masse δm à l'instant t en fonction de P_e , δV_e et δU_e ? Ecrire de même δH_s à l'instant $t+dt$, en fonction de P_s , δV_s et δU_s .

A2*f. Comment la relation établie en A2*d s'écrit-elle à l'aide de δH_e et δH_s ?

L'enthalpie massique d'une masse δm de fluide se définit par $h = \frac{\delta H}{\delta m}$. Soit D le débit massique à travers le dispositif.

A2*g. En reprenant la définition du débit massique, montrer que :

$$D(h_s - h_e) = \dot{W} + \dot{Q} \quad (\text{bilan enthalpique})$$

Ces résultats seront maintenant appliqués aux différents éléments de la chaîne de production.

3. Mélangeur \mathcal{M} et séparateur \mathcal{S}

Les fluides entrant et sortant sont caractérisés par leur débit massique, leur enthalpie massique, leur pression et leur température. Les schémas de principe sont représentés sur les figures 3 et 4. Ces éléments ne contiennent aucune partie mobile et ils ne fournissent ni travail ni chaleur au fluide qui les traverse. Ils fonctionnent de façon isobare.

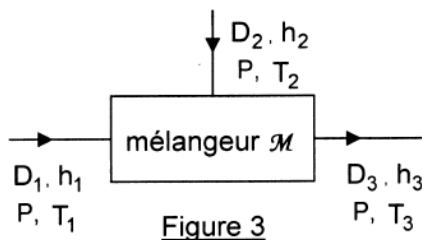


Figure 3

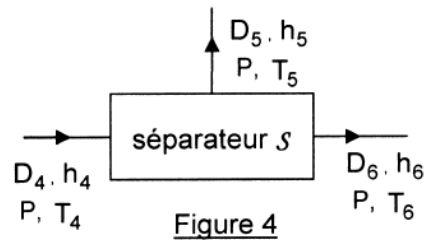


Figure 4

Les résultats seront exprimés en fonction des paramètres des figures 3 et 4.

A3*a. Déterminer l'enthalpie \dot{H}_e qui entre dans le mélangeur par unité de temps ainsi que l'enthalpie \dot{H}_s qui en sort par unité de temps.

A3*b. Déterminer la masse \dot{m}_e qui entre dans le mélangeur par unité de temps ainsi que la masse \dot{m}_s qui en sort par unité de temps.

A3*c. Quelles sont alors les deux relations régissant le fonctionnement du mélangeur, le régime étant permanent ?

Le séparateur S peut séparer deux phases d'un même fluide (ici, la phase gazeuse de la phase liquide) ou séparer un fluide homogène en deux courants distincts.

A3*d. Quelles sont les relations générales applicables à ces deux cas ? Que dire de toute façon sur les températures T_4 , T_5 et T_6 ?

Lorsque le dispositif divise un fluide homogène en deux courants (embranchement de tubulures), l'état du fluide n'est pas modifié entre l'entrée et la sortie du séparateur. Les fonctions d'état qui le caractérisent restent donc inchangées et $h_4 = h_5 = h_6$.

A3*e. Quelle est alors la seule relation régissant le fonctionnement du séparateur ?

4. Compresseur isotherme et détendeur adiabatique

Les schémas de principe de ces appareils réversibles sont représentés ci-dessous :

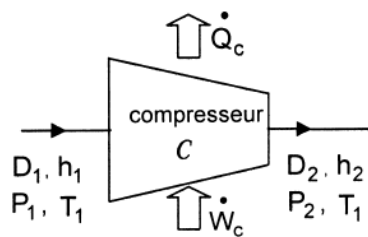


Figure 5

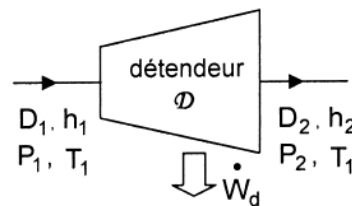


Figure 6

Le compresseur isotherme C vérifie $P_1 < P_2$ et $T_1 = T_2$; la puissance thermique \dot{Q}_c est **fournie à l'extérieur**.

Pour le détendeur adiabatique \mathcal{D} , $\dot{Q}_d = 0$ et $P_1 > P_2$; la puissance \dot{W}_d est **fournie à l'extérieur**.

A4*a. Comparer les débits D_1 et D_2 .

A4*b. Appliquer le bilan enthalpique au fonctionnement du compresseur.

A4*c. Appliquer le bilan enthalpique au fonctionnement du détendeur.

5. Échangeur thermique

Son schéma de principe est indiqué ci-contre (figure 7).

Les deux fluides suivent des circuits séparés et ne se mélangent pas ; les parois qui les séparent à l'intérieur de l'échangeur sont parfaitement rigides mais diathermes. L'échangeur \mathcal{E} ne contient aucune autre partie mobile et il est thermiquement isolé de l'extérieur.

Soit \dot{Q}_{ech} la chaleur passant du fluide (1 \rightarrow 2) au fluide (3 \rightarrow 4) par unité de temps.

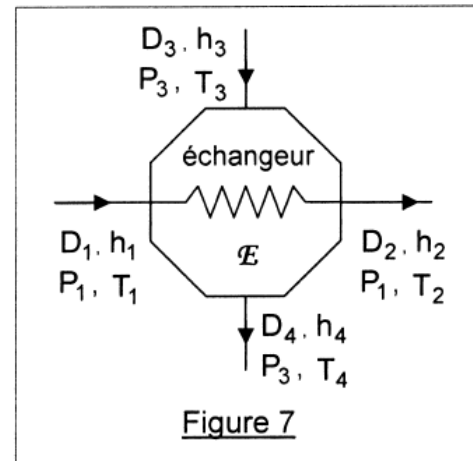


Figure 7

A5*a. Quelles sont les relations entre D_1 et D_2 d'une part, entre D_3 et D_4 d'autre part ?

A5*b. Ecrire le bilan enthalpique pour le fluide (1 \rightarrow 2) d'une part, pour le fluide (3 \rightarrow 4) d'autre part, en fonction de \dot{Q}_{ech} , D_1 , D_3 , h_1 , h_2 , h_3 et h_4 .

A5*c. Éliminer \dot{Q}_{ech} entre ces deux équations pour établir le bilan de l'échangeur \mathcal{E} .

A5*d. Quelle relation lie T_2 et T_4 si les fluides restent suffisamment longtemps dans l'échangeur pour que l'équilibre thermique s'établisse entre eux ? (l'échangeur fonctionnera alors de façon idéale)

6. Réchauffeur et robinet de laminage (figures 8 et 9)

A6*a. Dans un réchauffeur \mathcal{H} , le fluide s'écoule à pression constante en recevant uniquement une chaleur \dot{Q}_h par unité de temps. Quel y est le bilan enthalpique ?

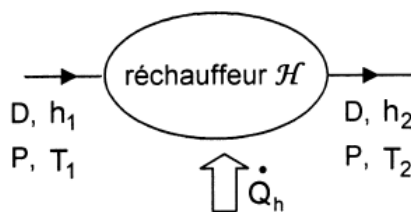


Figure 8

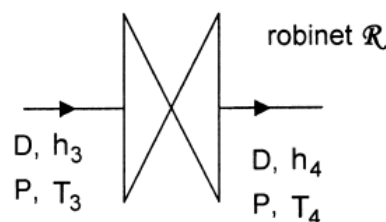


Figure 9

A6*b. Dans un robinet de laminage \mathcal{R} adiabatique, le fluide se détend sans action extérieure. Quel y est le bilan enthalpique ?

B. Procédé CLAUDE

Le procédé de production d'azote liquide est schématisé ci-dessous (figure 10).

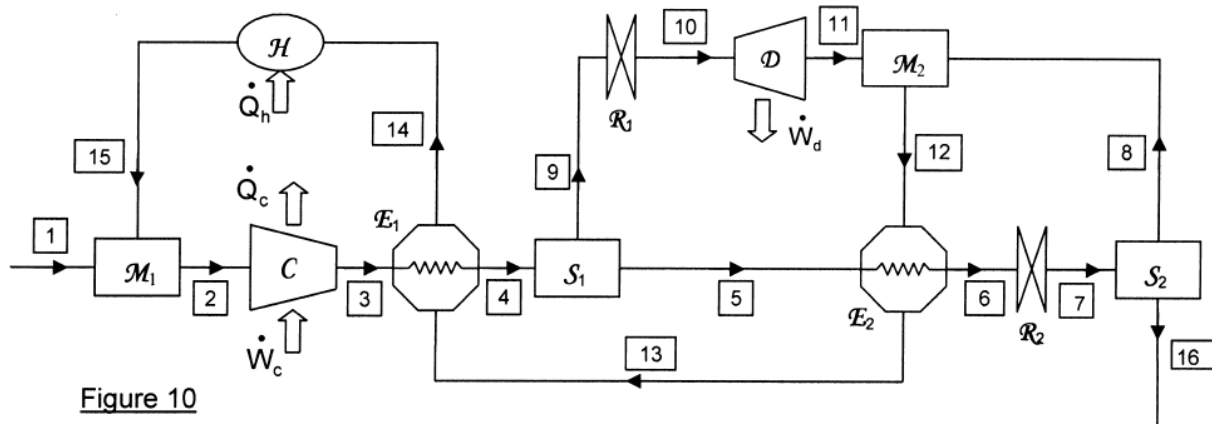


Figure 10

L'azote gazeux est admis dans la chaîne en [1], sous $P_1 = 1$ bar et à $T_1 = 300$ K avec un débit D_1 .

- Le compresseur (C) amène l'azote à 200 bar de façon isotherme ; le débit d'entrée vaut D_2 . Il est ensuite refroidi en passant par les deux échangeurs thermiques (E_1) et (E_2).
- Un robinet de laminage (R_2) ramène ensuite l'azote à la pression atmosphérique ; au cours de cette dernière opération, une partie de l'azote se liquéfie. Le séparateur (S_2) permet de récupérer la phase liquide (dont le débit d'écoulement est $D_{16} = 100 \text{ kg.h}^{-1}$) en la séparant de la phase gazeuse (orientée en [8] avec un débit D_8).
- La phase gazeuse est utilisée pour refroidir le système. Elle est mélangée par (M_2) à la partie de l'azote qui a été prélevée entre (E_1) et (E_2), au niveau du séparateur (S_1) avec un débit D_9 . Ce gaz prélevé est tout d'abord détendu par un robinet de laminage (R_1) jusqu'à une pression P_{10} puis détendu de façon adiabatique et réversible dans (D), qui le ramène à la pression de 1 bar.
- Les gaz froids, une fois mélangés, s'écoulent avec un débit D_{12} à travers les deux échangeurs, puis ils sont réchauffés en (H) pour retrouver la température $T_{15} = 300$ K. Ils sont ensuite recyclés dans le circuit de liquéfaction par le mélangeur isotherme (M_1).

1. Débits

B1*a. Etablir quatre relations entre D_1 , D_2 , D_5 , D_8 , D_9 , D_{12} et D_{16} .

B1*b. En déduire que $D_1 = D_{16}$.

B1*c. Soit x_L la fraction massique du liquide après le robinet de laminage (R_2). Exprimer D_5 et D_8 en fonction de x_L et D_{16} .

A.N. : le fonctionnement du circuit est tel que $x_L = 35 \%$. Calculer D_5 et D_8 .

B1*d. Le débit total est $D_2 = 1000 \text{ kg.h}^{-1}$. Déterminer D_9 et D_{12} .

2. Enthalpies

Les enthalpies massiques peuvent être déterminées tout au long du processus.

B2*a. Expliquer l'origine de la relation $h_1 = h_2 = h_{15}$.

Le tableau ci-dessous précise leurs valeurs en différentes parties du système de production.

point	[1]	[3]	[8]	[16]
$h \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)}$	460	430	225	35

B2*b. Quelle autre relation lie h_4 , h_9 et h_5 ? Que vaut h_{10} ?

B2*c. Exprimer h_7 en fonction de h_8 , h_{16} et x_L . Calculer numériquement h_7 ; en déduire h_6 .

B2*d. L'échangeur (\mathcal{E}_1) fonctionne de façon idéale. Sachant que la chaleur échangée entre les fluides dans cet échangeur est $\dot{Q}_1 = 90 \text{ MJ.h}^{-1}$, déterminer h_4 et trouver une relation entre h_{13} et h_{14} .

Dans le domaine de température étudié et sous une pression de 1 bar, l'enthalpie massique peut s'écrire : $h = 168 + 0,856T + 4,63 \times 10^{-4} T^2 \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)}$.

B2*e. Sachant que $T_{13} = 135 \text{ K}$, calculer h_{13} puis, à l'aide de la relation précédente, déterminer h_{14} . En déduire T_{14} .

B2*f. L'échangeur (\mathcal{E}_2) fonctionne aussi de façon idéale ; calculer h_{12} .

B2*g. En déduire h_{11} à l'aide d'un bilan appliqué au mélangeur (\mathcal{M}_2).

3. Énergies

B3*a. À l'aide du tableau d'enthalpies massiques donné au B.2, déterminer la chaleur latente massique de vaporisation L_v de l'azote sous 1 bar.

La température de liquéfaction de l'azote sous 1 bar est de $T_L = 77 \text{ K}$.

Globalement, en une heure, la machine (procédé CLAUDE) fait passer une masse D_{16} d'azote de l'état gazeux à l'état liquide. Pour évaluer les échanges d'énergie, il est possible d'envisager une liquéfaction directe de cette masse en l'amenant, par un processus non développé ici, de la température ambiante ($T_1 = 300 \text{ K}$) à la température de liquéfaction (77 K) puis en effectuant la liquéfaction totale.

B3*b. Quelle puissance P_r est récupérée lors du refroidissement de T_1 à T_L d'une masse horaire égale à D_{16} ? Même question pour la liquéfaction totale de cette masse.

B3*c. Quelle est la puissance totale P_{tot} prélevée sur l'azote au cours de ce processus ?

B3*d. En réalisant le bilan enthalpique du détendeur adiabatique, calculer \dot{W}_d .

B3*e. Quelle est la puissance \dot{Q}_h consommée par le réchauffeur ?

B3*f. En utilisant les propriétés des fonctions d'état, trouver une relation entre \dot{W}_d , \dot{Q}_h , \dot{W}_c , \dot{Q}_c et P_{tot} .

Le compresseur consomme une puissance $\dot{W}_c = 132 \text{ kW}$.

B3*g. En étudiant le bilan enthalpique du compresseur, déterminer \dot{Q}_c en kW.

B3*h. Quel lien existe-t-il entre \dot{W}_c et \dot{Q}_c pour un gaz parfait ? Pourquoi l'azote ne peut-il être considéré ici comme un gaz parfait ?

RéponsesProduction de l'azote liquide

A1

$$D_e = D_1 + D_2$$

$$D_s = D_3 + D_4$$

$$D_e = D_s \text{ soit}$$

$$D_1 + D_2 = D_3 + D_4 \text{ ou}$$

$\sum_i D_i = 0$

on compte positivement ce qui entre
et négativement ce qui sort

$D_1 + D_2 - D_3 - D_4 = 0$

A2a) \dot{W} et \dot{Q} sont des puissances donc

en watt W

(cf: $J s^{-1}$)
(en $J h^{-1}$ dans les A.N.)

A2b) à l'entrée, pour la masse élémentaire considérée

$$\delta W_{Pe} = \int_{\delta V_e}^0 -P_e dV = P_e \delta V_e \quad (>0 \text{ cf reçu})$$

à la sortie

$$\delta W_{Ps} = \int_0^{\delta V_s} -P_s dV = -P_s \delta V_s \quad (<0 \text{ cf reçu négatif donc fourni})$$

$\delta W_P = P_e \delta V_e - P_s \delta V_s$

A2c) $\delta W = \dot{W} dt + \delta W_P$

$\delta W = \dot{W} dt + P_e \delta V_e - P_s \delta V_s$

$\delta Q = \dot{Q} dt$

A2d) La variation d'énergie interne de δm est donc

$$\delta U_s - \delta U_e$$

et en vertu du premier principe

$$\delta U_s - \delta U_e = \delta W + \delta Q$$

$\delta U_s - \delta U_e = (\dot{W} + \dot{Q}) dt + P_e \delta V_e - P_s \delta V_s$

A 2 e) Pour une masse finie : $H = U + PV$
 Pour une masse δm : $\delta H = \delta U + P \delta V$

$$\begin{aligned}\delta H_e &= \delta U_e + P_e \delta V_e \\ \delta H_s &= \delta U_s + P_s \delta V_s\end{aligned}$$

A 2 f) finalement

$$\delta H_s - \delta H_e = (\dot{W} + \dot{Q}) dt$$

A 2 g) $\delta H_s = h_s \delta m = h_s D dt$ avec $\dot{H}_s = h_s D$
 $\delta H_e = h_e \delta m = h_e D dt$ avec $\dot{H}_e = h_e D$

$$D (h_s - h_e) = \dot{W} + \dot{Q}$$

A 3 a) $\dot{H}_e = h_1 D_1 + h_2 D_2$

$$\dot{H}_s = h_3 D_3$$

A 3 b) $\dot{m}_e = D_1 + D_2$

$$\dot{m}_s = D_3$$

A 3 c) La masse est conservée

$$D_1 + D_2 - D_3 = 0 \quad (\text{cf } \sum_i D_i = 0)$$

L'enthalpie est conservée puisque \dot{W} et \dot{Q} sont nuls.

$$h_1 D_1 + h_2 D_2 - h_3 D_3 = 0 \quad (\text{cf } \sum_i h_i D_i = 0)$$

A 3 d) La masse est conservée

$$D_4 - D_5 - D_6 = 0$$

L'enthalpie est conservée

$$h_4 D_4 - h_5 D_5 - h_6 D_6 = 0$$

On a de plus (cf fluide divisé en deux, ou 2 phases en équilibre donc à la même température)

$$T_4 = T_5 = T_6$$

dans le cas du séparateur $h_4 = h_5 = h_6$, la seule relation est de manière évidente

$$D_4 = D_5 + D_6$$

(pour deux phases différentes $h_{\text{vapeur}} > h_{\text{liquide}}$ donc $h_4 \neq h_5 \neq h_6$)

A 4 a) En régime permanent, la masse qui entre par unité de temps est égale à la masse qui sort par unité de temps.

(la compression ou la détente modifient le débit volumique mais pas le débit massique)

$$D_1 = D_2$$

A 4 b) $D_2 h_2 - D_1 h_1 = \dot{W}_c - \dot{Q}_c$ (cf sens positif de \dot{Q}_c)

$$D_1 (h_2 - h_1) = \dot{W}_c - \dot{Q}_c$$

A 4 c) $D_2 h_2 - D_1 h_1 = -\dot{W}_D$ (cf sens positif de \dot{W}_D)

$$D_1 (h_2 - h_1) = -\dot{W}_D$$

A 5 a)
$$\begin{aligned} D_1 &= D_2 \\ D_3 &= D_4 \end{aligned}$$

A 5 b) Le fluide 1→2 perd \dot{Q}_{ech}
Le fluide 3→4 reçoit \dot{Q}_{ech}

$$D_1 (h_2 - h_1) = -\dot{Q}_{\text{ech}}$$

$$D_3 (h_4 - h_3) = +\dot{Q}_{\text{ech}}$$

A 5 c)
$$D_1 (h_2 - h_1) + D_3 (h_4 - h_3) = 0$$

On retrouve pour l'échangeur complet isolé thermiquement

$$D_1 h_1 + D_3 h_3 - D_1 h_2 - D_3 h_4 = 0$$

A 5 d)
$$T_2 = T_4$$

$$A\ 6\ a) \quad D(h_2 - h_1) = \dot{Q}_h$$

$$A\ 6\ b) \quad D(h_4 - h_3) = 0$$

$$h_4 = h_3$$

(cf détente de Joule ^{Kelvin} Thomson)

B 1 a) au niveau de M1	:	$D_1 + D_{12} = D_2$
au niveau de S1	:	$D_2 = D_5 + D_9$
au niveau de M2	:	$D_8 + D_9 = D_{12}$
au niveau de S2	:	$D_5 = D_8 + D_{16}$

B 1 b) on fait la somme de ces quatre équations :

$$D_1 = D_{16}$$

B 1 c) en 16 on récupère la phase liquide et en 8 la phase vapeur.

$$\text{Donc } D_{16} = x_L D_7$$

$$D_8 = x_V D_7 = (1 - x_L) D_7$$

avec D_7 correspond à D_5

$$D_5 = \frac{D_{16}}{x_L}$$

$$D_8 = \frac{(1 - x_L)}{x_L} D_{16}$$

$$A.N. \quad D_5 = \frac{100}{0,35}$$

$$D_8 = \frac{100 \cdot 0,65}{0,35}$$

$$D_5 = 286 \text{ kg h}^{-1}$$

$$D_8 = 186 \text{ kg h}^{-1}$$

B 1 d) $D_9 = D_2 - D_5$ (cf au niveau de S1)
 $= 1000 - 286$

$$D_9 = 714 \text{ kg h}^{-1}$$

$D_{12} = D_2 - D_1$ (cf au niveau de M1)
 $= D_2 - D_{16}$
 $= 1000 - 100$

$$D_{12} = 900 \text{ kg h}^{-1}$$

B 2 a) $h = h(\text{état physique, pression, température})$

état 1	gaz	$P_1 = 1 \text{ bar}$	$T_1 = 300 \text{ K}$
état 15	gaz	8: $P 1 \text{ bar}$ (cf R2) 11: $P 1 \text{ bar}$ (cf D) (on suppose 12 à 15 à Press 1 bar)	$T_{15} = 300 \text{ K}$

donc 2 idem (gaz, 1 bar, 300 K)

finallement: $h_1 = h_2 = h_{15}$

B 2 b) $h_4 = h_9 = h_5$ (cf séparateur)

$h_{10} = h_9$ (cf robinet de laminage)

B 2 c) Deux méthodes d'approche pour résoudre cette question :

- soit bilan au niveau de S2

$$D_7 h_7 = D_{16} h_{16} + D_8 h_8$$

$$D_7 h_7 = x_L D_7 h_{16} + x_V D_7 h_8$$

$$h_7 = x_L h_{16} + (1 - x_L) h_8$$

- soit partir de la relation connue pour les mélanges biphasés en équilibre

$$h = x_L h_L + x_V h_V$$

$$h_7 = x_L h_{16} + (1 - x_L) h_8$$

A.N. $h_7 = 0,35 \cdot 35 + 0,65 \cdot 225$

$$h_7 = 158,5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_6 = h_7 \text{ (cf robinet de laminage)}$$

$$h_6 = 158,5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

B 2 d) Au niveau de l'échangeur, 3 → 4 le fluide est refroidi

$$D_3 (h_4 - h_3) = -\dot{Q}_1$$

$$h_4 = h_3 - \frac{\dot{Q}_1}{D_2}$$

A.N. $= 430 - \frac{90 \cdot 10^3}{10^3}$

$$h_4 = 340 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Pour le fluide 13 → 14, on aura

$$D_{13} (h_{14} - h_{13}) = +\dot{Q}_1$$

$$h_{14} - h_{13} = \frac{\dot{Q}_1}{D_{12}}$$

A.N. $= \frac{90 \cdot 10^3}{900}$

$$h_{14} - h_{13} = 100 \text{ kJ kg}^{-1}$$

B 2 e)

$$h_{13} = 168 + 0,856 (135) + 4,63 \cdot 10^{-4} (135)^2$$

$$h_{13} = 292 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_{14} = h_{13} + 100$$

$$h_{14} = 392 \text{ kJ kg}^{-1}$$

on résout

$$392 = 168 + 0,856 T_{14} + 4,63 \cdot 10^{-4} T_{14}^2$$

$$T_{14} = 232,5 \text{ K}$$

B 2 f) Au niveau de l'échangeur E_2

$$D_5 (h_6 - h_5) + D_{12} (h_{13} - h_{12}) = 0$$

$$h_{12} = h_{13} + \frac{D_5}{D_{12}} (h_6 - h_5)$$

↓ = h_4

A.N.

$$= 292 + \frac{286}{900} (158,5 - 340)$$

$$h_{12} = 234,4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

B 2 g) Au niveau du mélangeur M_2

$$D_{11} h_{11} + D_8 h_8 = D_{12} h_{12}$$

$$h_{11} = \frac{D_{12} h_{12} - D_8 h_8}{D_9}$$

A.N.

$$= \frac{900 \times 234,4 - 186 \times 225}{714}$$

$$h_{11} = 236,8 \text{ kJ kg}^{-1}$$

B 3 a)

$$L_v = h_v - h_L$$

$$L_v = h_8 - h_{16}$$

A.N.

$$L_v = 190 \text{ kJ kg}^{-1}$$

B 3 b) Puissance fournie par le refroidissement du gaz

$$P_r = - D_{16} (h_v - h_1)$$

$$P_r = - D_{16} (h_8 - h_1)$$

A.N.

$$= - 100 (225 - 460)$$

$$P_r = 23500 \text{ kJ h}^{-1}$$

et pour sa liquéfaction :

$$P'_r = - D_{16} (-L_v)$$

$$P'_r = D_{16} L_v$$

$$\text{A.N.} = 100 \times 190$$

$$P'_r = 19000 \text{ kJ h}^{-1}$$

$$\text{B 3 c)} P_{\text{tot}} = P_r + P'_r$$

$$P_{\text{tot}} = 42500 \text{ kJ h}^{-1}$$

$$\text{B 3 d)} \text{ Au niveau du détendeur}$$

$$D_{10} (h_{11} - h_{10}) = -\dot{W}_d$$

$$\dot{W}_d = D_g (h_4 - h_{11})$$

$$\text{A.N.} = 714 (340 - 236,8)$$

$$\dot{W}_d = 73700 \text{ kJ h}^{-1}$$

$$\text{B 3 e)} \text{ Au niveau du réchauffeur}$$

$$D_{14} (h_{15} - h_{14}) = \dot{Q}_h$$

$$\dot{Q}_h = D_{12} (h_1 - h_{14})$$

$$\text{A.N.} = 900 (460 - 392)$$

$$\dot{Q}_h = 61200 \text{ kJ h}^{-1}$$

$$\text{B 3 f)} \text{ En considérant la chaîne complète}$$

$$\underbrace{D_1 (h_{16} - h_1)}_{-P_{\text{tot}}} = \dot{W}_c - \dot{Q}_c + \dot{Q}_h - \dot{W}_d$$

$$\text{B 3 g)} \dot{Q}_c = \dot{W}_c + \dot{Q}_h + P_{\text{tot}} - \dot{W}_d$$

$$\text{A.N.}$$

$$\dot{Q}_c / \text{kW} = 132 + (61200 + 42500 - 73700) \frac{1}{3600}$$

$$= 132 + 8,3$$

↑ conversion
en kW

$$\dot{Q}_c = 140,3 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_c = 132 \text{ kW}$$

$$\text{B 3 h)} \text{ Pour un gaz parfait, dans une compression isotherme}$$

$$D_2(h_3 - h_2) = \dot{W}_c - \dot{Q}_c$$

~~~~~

$h = h(T)$  pour un gaz parfait

donc  $h_3 = h_2$

$$\boxed{\dot{W}_c = \dot{Q}_c}$$

Ici

$$\dot{Q}_c > \dot{W}_c.$$

L'azote est au cours de ce cycle comprimé à 200 bar et à la fin une partie se liquéfie. Ces conditions sont éloignées du gaz parfait (gaz à P "faible" et à T "élevée" où les molécules sont "éloignées" les unes des autres)

---