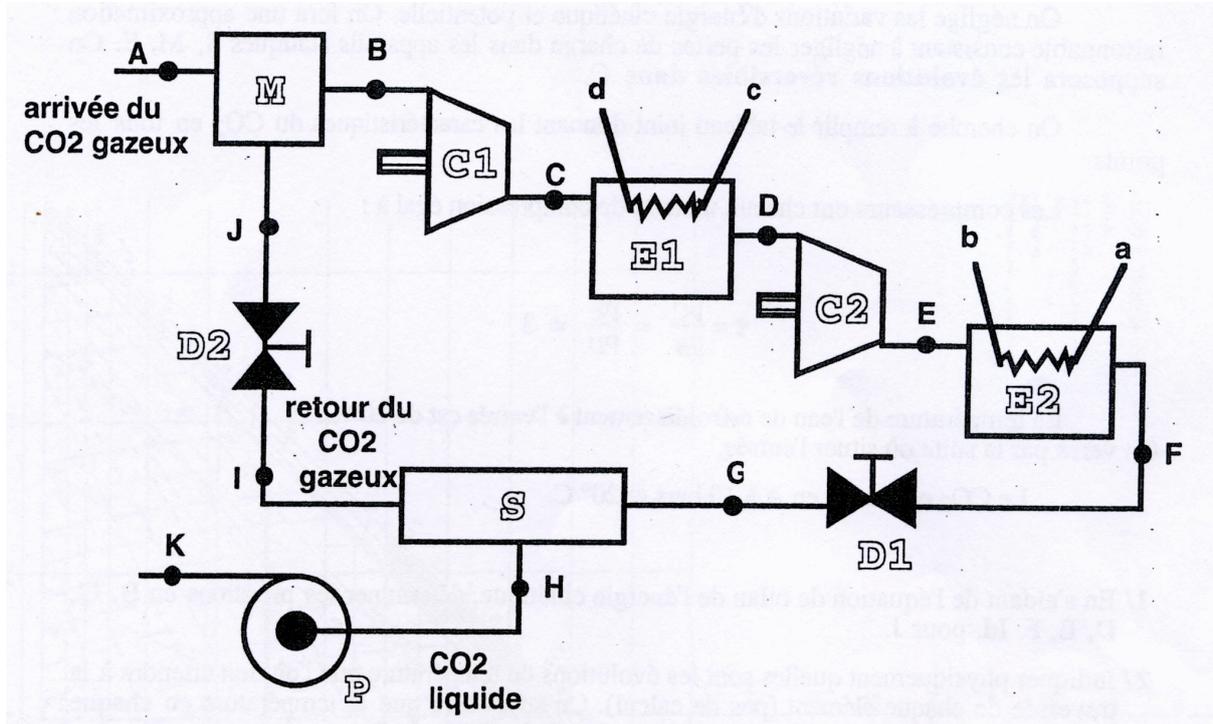


TD 8 de thermodynamique  
1<sup>ère</sup> année hydraulique

On désire étudier un procédé de liquéfaction du CO<sub>2</sub> dont le schéma est le suivant.



Il comporte un circuit de CO<sub>2</sub> repéré par des lettres majuscules et un circuit d'eau de refroidissement repéré par des lettres minuscules. Les éléments sont les suivants :

	éléments	entrées	sorties
M	mélangeur	A, I	B
C1	compresseur	B	C
C2	compresseur	D	E
E1	échangeur	C, c (ou d)	D, d (ou c)
E2	échangeur	E, a (ou b)	F, b (ou a)
D1	détendeur	F	G
D2	détendeur	I	J
S	séparateur	G	H, J
P	pompe	H	K

Tous les éléments *sont calorifugés* avec le milieu extérieur. Le détendeur est un organe à la traversée duquel le fluide subit **une diminution de pression**. La séparation des phases liquide et gazeuse est effectuée dans S de **manière statique**.

On néglige *les variations d'énergie cinétique et potentielle*. On fera une approximation raisonnable consistant à *négliger les pertes de charge dans les appareils statiques S, M, E*. On supposera les *évolutions réversibles* dans les compresseurs (sauf question 7). On cherche à remplir le tableau ci-joint donnant les caractéristiques du CO<sub>2</sub> en tous les points.

Les compresseurs ont chacun un taux de compression égal à :

$$\tau = 3$$

La température de l'eau de refroidissement à l'entrée est de **20° C**.

Le CO<sub>2</sub> est admis en A à **10 bars et 20° C**, avec un débit massique de **1 kg/s**.

### 1 Calcul des pressions

a / A l'aide du premier principe de la thermodynamique pour les systèmes ouverts en régime permanent, en supposant que les transformations sont réversibles, démontrer que :

$$\dot{W} = \int \dot{v} dP$$

b / En déduire les valeurs des pressions en B, C, D, E, F et J. (*on négligera les variations de volume massique dans les échangeurs*).

### 2 Variation des températures

a / Démontrer que pour M, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> et S les transformations sont isenthalpes.

b / Si la température est inférieure à la température d'inversion du coefficient de Joule-Thomson  $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h > 0$ , donner le sens de variation de la température pour D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> et S.

c / A l'aide du premier principe de la thermodynamique, déterminer le sens de variation de T pour C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub>.

### 3 Calcul des titres massique de vapeur

On cherche à produire du CO<sub>2</sub> liquide à la température ambiante (**20° C**).

a / Quel est la nature de la phase du CO<sub>2</sub> en G?

b / A l'aide du diagramme (T,s) déterminer les pressions en G, H et I. Placer les points H et I sur le diagramme. En déduire la température en G et I.

c / Quelle est la nature de la transformation en D<sub>2</sub>? En déduire h<sub>J</sub>. Placer J sur le diagramme à l'aide de P<sub>J</sub> déterminé au **1.1 b/**. En déduire sur le diagramme le titre massique de vapeur x<sub>J</sub> en J.

#### 4 Calcul de $T_c$ et $T_E$ . Tracé du cycle sur le diagramme du $\text{CO}_2$ .

- a / Quelle est la nature de la phase du  $\text{CO}_2$  en G pour que la le débit de gaz en I soit nul ?
- b / Où est placé G sur le diagramme dans ce cas là ?
- c / En déduire  $T_F$  sur le diagramme.
- d / Comme l'obtention d'une telle température est difficile avec un réfrigérant à  $20^\circ\text{C}$  *on se limite à  $T_F = 40^\circ\text{C}$* . Placer F sur le diagramme.
- e / En déduire  $x_G$  sur le diagramme. Placer G.
- f / Effectuer un bilan de masse en M et S.
- g / Exprimer  $x_G$  en fonction de  $\dot{m}_I$  et  $\dot{m}_G$  .
- h / En déduire  $\dot{m}_I$  et  $\dot{m}_G$  . Donner les débits massiques en chaque point.
- i / Effectuer un bilan enthalpique en M. En déduire à l'aide du diagramme  $h_B$  puis  $T_B$ . Placer A et B.
- j / Quelle est la variation d'entropie entre B et C ? Placer C sur le diagramme. En déduire  $T_C$ .
- k / On cherche à refroidir dans  $E_1$  à  $T_D = 35^\circ\text{C}$ . Placer D.
- l / De la même manière que pour j/ , déterminer  $T_E$  et placer E.

#### 5 Puissances mécaniques et thermiques

- a / Quelle est la puissance calorifique extraite au niveau des échangeur ?
- b / Quelle est la puissance mécanique  $\dot{W}_{\text{réel}}$  fournit par les compresseurs ?
- c / On veut liquéfier directement le gaz entre A et H. On suppose la transformation réversible. A l'aide du diagramme :  
Calculer la puissance calorifique extraite.  
Calculer la variation d'enthalpie.  
En déduire la puissance mécanique fournit  $\dot{W}_{\text{réversible}}$  .  
Calculer le rendement de la compression en utilisant les résultats du b / .  
Où sont les pertes associées ?

#### 6 Calcul de la puissance de la pompe

Calculez le travail de la pompe pour élever la pression du liquide à 70 bars afin de prévenir une revaporisation. On supposera le volume massique du  $\text{CO}_2$  liquide constant pendant la transformation ( $v = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ ).

#### 7 Etude du cycle réel

On considère maintenant que les compresseurs ont un rendement isentropique de 65%.

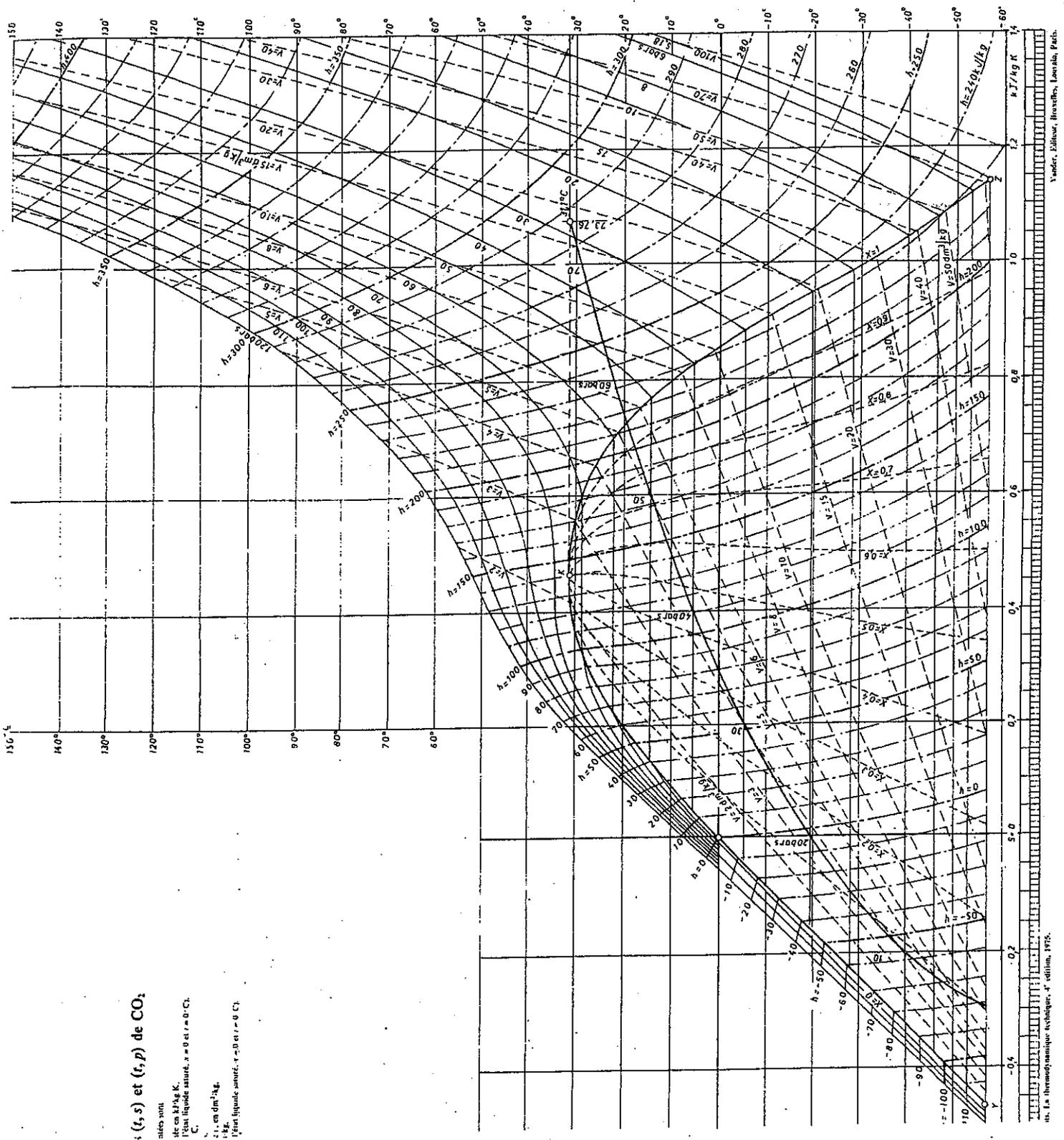
Reprendre les questions 4j/ 4k/ et 4l/, en prenant en compte les rendements des compresseurs.

En déduire le travail réel fournit par les compresseurs ainsi que la chaleur extraite par les échangeurs.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Température °C											
Pression Bar											
Titre massique de vapeur %											
Enthalpie KJ/kg											
Débit massique Kg/s											

$s(t, s)$  et  $(t, p)$  de  $\text{CO}_2$

unités sont  
 les en  $\text{kg}/\text{kg K}$   
 l'état liquide saturé,  $x = 0$  et  $t = 0^\circ \text{C}$   
 C.  
 $s$  en  $\text{dm}^3/\text{kg}$   
 $p$  en  $\text{kg}/\text{cm}^2$   
 l'état liquide saturé,  $x = 0$  et  $t = 0^\circ \text{C}$



Ab. Le thermodynamique Aviligne, 4<sup>e</sup> édition, 1975.

Yander, Editeur, Bruxelles, Louvain, Paris.

CARACTERISTIQUES DANS LES CONDITIONS DE SATURATION DU CO<sub>2</sub>

$t$ °C	$p$ bars	$v_l$ m <sup>3</sup> /kg	$v_v$ m <sup>3</sup> /kg	$h_l$ kJ/kg	$h_v$ kJ/kg	$L_{lv}$ kJ/kg	$s_l$ kJ/kg/K	$s_v$ kJ/kg/K
-56,6	5,18	0,000849	0,072220	-117,4	230,6	348,0	-0,4815	1,1405
-55	5,55	0,000853	0,067620	-114,2	231,2	345,4	-0,4534	1,1304
-50	6,84	0,000867	0,055407	-104,6	232,7	337,3	-0,4103	1,1015
-45	8,33	0,000881	0,045809	-95,0	234,0	329,0	-0,3684	1,0739
-40	10,05	0,000897	0,038164	-85,5	235,2	320,7	-0,3274	1,0480
-35	12,02	0,000913	0,032008	-76,2	236,1	312,3	-0,2872	1,0228
-30	14,27	0,000931	0,027001	-66,2	236,8	303,0	-0,2479	0,9986
-25	16,81	0,000950	0,022885	-56,4	237,3	293,7	-0,2089	0,9747
-20	19,67	0,000971	0,019466	-46,3	237,5	283,8	-0,1700	0,9512
-15	22,89	0,000994	0,016609	-35,8	237,4	273,2	-0,1298	0,9286
-10	26,47	0,001019	0,014194	-24,7	237,0	261,7	-0,0892	0,9056
-5	30,45	0,001048	0,012141	-12,9	236,2	249,1	-0,0460	0,8830
0	34,85	0,001081	0,010383	0,0	235,0	235,0	0,0000	0,8604
+5	39,72	0,001100	0,008850	+13,0	232,2	219,2	+0,0431	0,8311
+10	45,06	0,001166	0,007519	+27,2	228,6	201,3	+0,0913	0,8026
+15	50,93	0,001223	0,006323	+42,3	222,6	180,3	+0,1424	0,7683
+20	57,33	0,001297	0,005269	+58,6	213,9	155,3	+0,1959	0,7299
+25	64,32	0,001417	0,004167	+78,7	198,2	119,5	+0,2629	0,6636
+30	71,92	0,001680	0,002979	+108,5	171,5	63,0	+0,3576	0,5664
+31,1	73,76	0,002160	0,002160	+139,8	139,8	0,0	+0,4601	0,4601

TABLE 9