

Travaux Dirigés

La Cryogénie

Question de cours

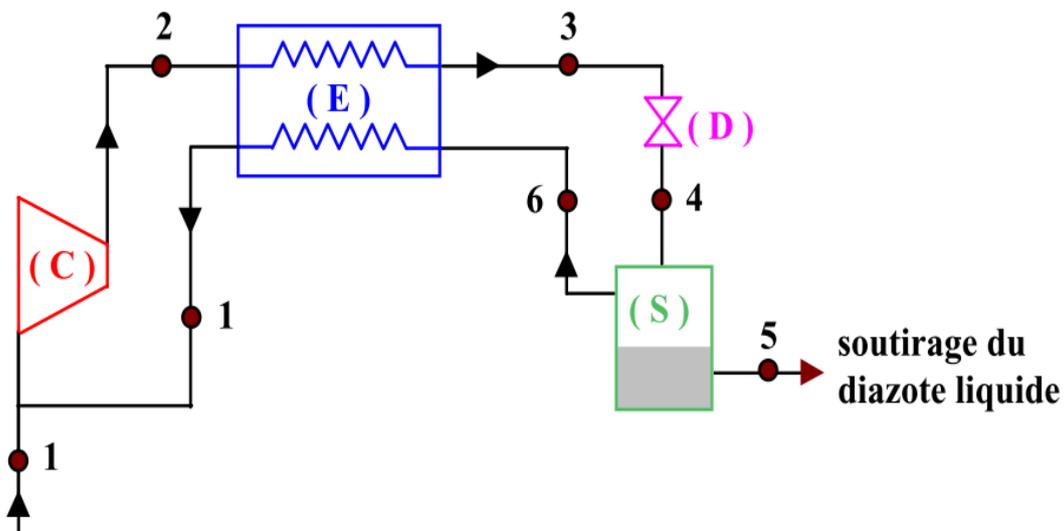
- 1- Citer les différents cas de la matière et schématiser leurs transformations.
- 2- Quel sont les fluides cryogéniques ?
- 3- Donner une définition de la liquéfaction
- 4- Quel est la différence entre une installation frigorifique et une installation cryogéniques ?
- 5- Justifier que la détente de J-T est une détente Isenthalpique.
- 6- Expliquer en bref la courbe d'inversion du gaz (diagramme TP)

Etude du cycle

Exercice 01 :

Cycle de LINDE simple

La figure ci-dessous représente le schéma de principe du procédé LINDE , utilisé pour produire de l'azote liquide (du diazote liquide, en nomenclature systématique).



L'azote entre dans le compresseur (C) dans l'état 1 caractérisé par $p_1 = 1 \text{ bar}$ et $T_1 = 290 \text{ K}$; il y subit une compression qui l'amène à la pression $p_2 = 200 \text{ bar}$.

Il est, ensuite, refroidi à pression constante jusqu'à la température $T_E = 158 \text{ K}$ dans l'échangeur (E) puis détendu jusqu'à la pression atmosphérique $p_4 = 1 \text{ bar}$ dans le détendeur (D).

L'azote liquide est extrait du séparateur (S) et la vapeur saturée sèche d'azote est utilisée pour refroidir l'azote dans l'échangeur. On admettra que cette vapeur d'azote est ramenée à l'état 1 à la sortie de l'échangeur.

A - Étude de la compression

Le compresseur (C) est refroidi uniquement par un circuit d'eau dans lequel l'eau subit une augmentation de température de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. On admet que la compression de l'azote s'effectue de façon isotherme de l'état 1 à l'état 2 ($p_2 = 200\text{ bar}$).

En utilisant le diagramme entropique de l'azote, on demande :

1° question : De placer sur le diagramme les points A et B représentant les états 1 et 2 de l'azote. En déduire les enthalpies et entropies massiques.

2° question : De calculer la quantité de chaleur échangée au cours de cette compression.

3° question : De déterminer la masse d'eau nécessaire au refroidissement du compresseur lorsque celui-ci comprime une masse de $m = 1\text{ kg}$ d'azote.

La capacité thermique massique de l'eau est $C = 4,18\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4° question : De déterminer le travail échangé entre l'unité de masse d'azote et le compresseur.

B - Etude du refroidissement :

L'azote, à la sortie du compresseur, est refroidi dans l'échangeur (E) à pression constante p_2 jusqu'à ce que sa température atteigne la valeur de 158 K . Il subit, ensuite, une détente isenthalpique jusqu'à la pression $p_4 = 1\text{ bar}$.

1° question : Placer, sur le diagramme entropique, les points C et D correspondant aux états de l'azote à la sortie de l'échangeur (E) et du détendeur (D). Quelle est la température correspondant au point D ?

2° question : Quelles sont les enthalpies et les entropies massiques aux points C et D ?

3° question : Représenter également les points E et F correspondant à l'azote liquide (état 5) et à la vapeur sèche saturée (état 6). Quelles sont les enthalpies et les entropies massiques aux points E et F ?

4° question : Quel est le titre de la vapeur en D ? En déduire la masse d'azote liquide obtenue par kilogramme d'azote.

5° question : Calculer le travail de compression nécessaire pour obtenir un kilogramme d'azote liquide.

En déduire la puissance du compresseur si l'on désire obtenir 40 kg d'azote liquide par heure.

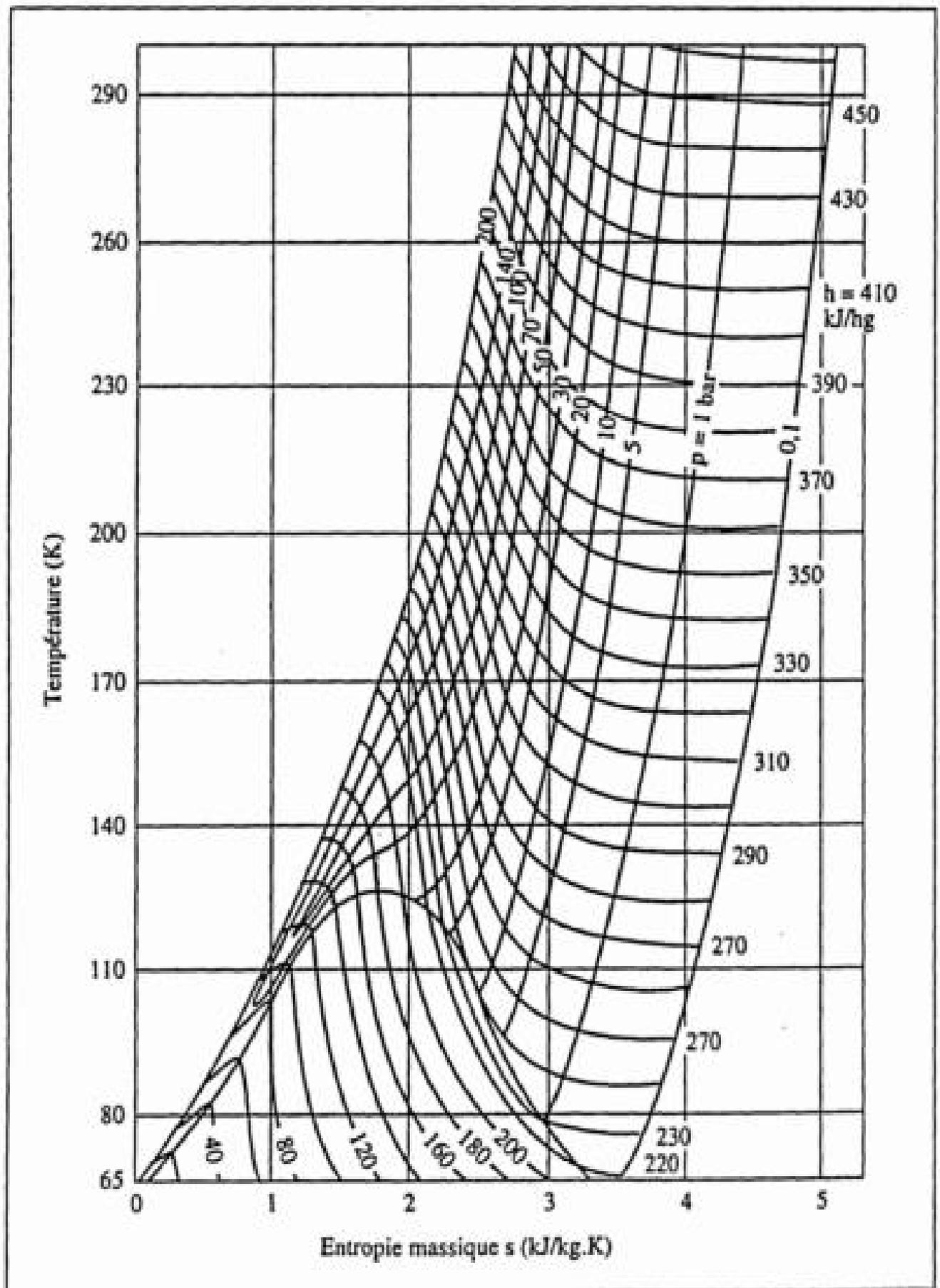
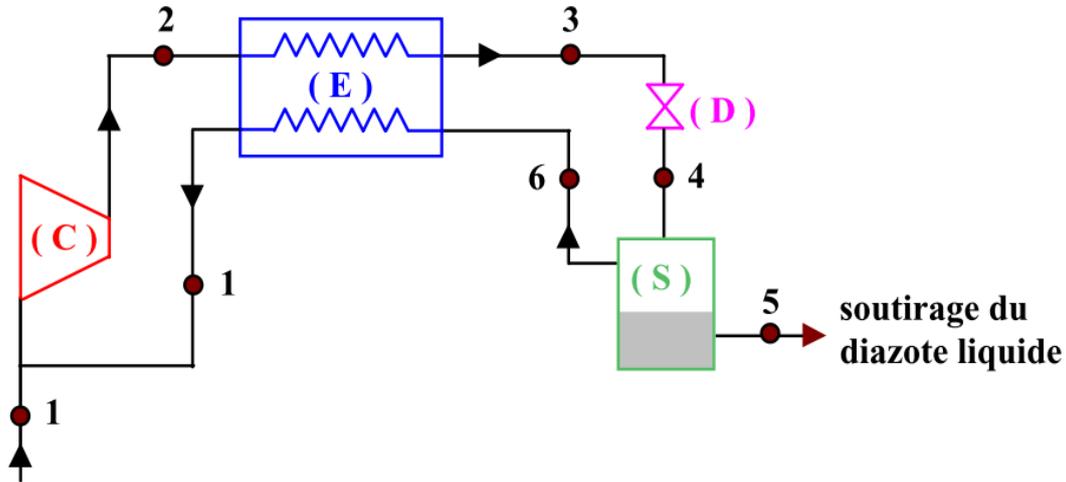


Diagramme de l'azote.

Exercice 02 :

Cycle de LINDE simple

La figure ci-dessous représente le schéma de principe du procédé LINDE , utilisé pour produire de l'azote liquide (du diazote liquide, en nomenclature systématique).



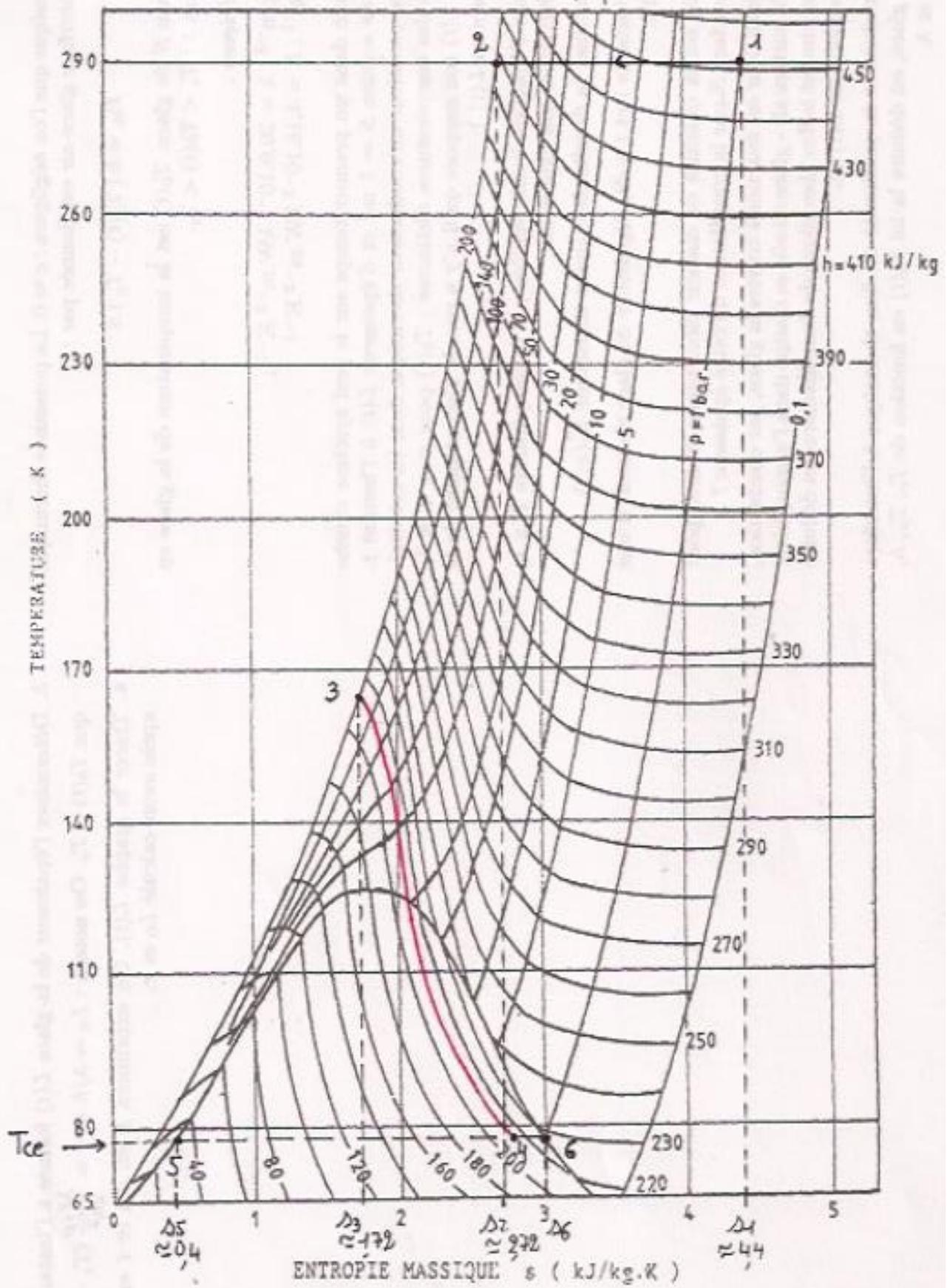
Le gaz d'azote est comprimé iso-thermiquement dans un compresseur (Cp) du point 1 avec $T_1 = 17(^{\circ}\text{C})$ et $P_1 = 1(\text{bar})$ jusqu'au point 2, puis il subit un refroidissement dans l'échangeur à contre-courant au point 3 à pression constante $P_3 = 200(\text{bar})$, la détente à travers la vanne de J-T permet le fluide d'atteindre le point 4 à la même pression du point de départ dans le séparateur du liquide.

On donne la température de changement d'état $T_{ce} = 76(\text{k})$

Questions :

- 1- À partir du diagramme entropique d'azote tirer les valeurs de différents points du cycle de J-T.
- 2- Déterminer la quantité de chaleur dégagée pendant la compression ainsi que le travail nécessaire pour la compression pour unité de masse du gaz d'azote.
- 3- *La quantité de chaleur échangée dans l'échangeur contre-courant.*
- 4- Déterminer les paramètres des points 3 et 4
- 5- Calculer la fraction du gaz liquéfié.
- 6- Déduire le travail nécessaire pour la liquéfaction
- 7- Calculer le facteur de mérite FOM

DIAGRAMME DE L'AZOTE
(diagramme entropique)



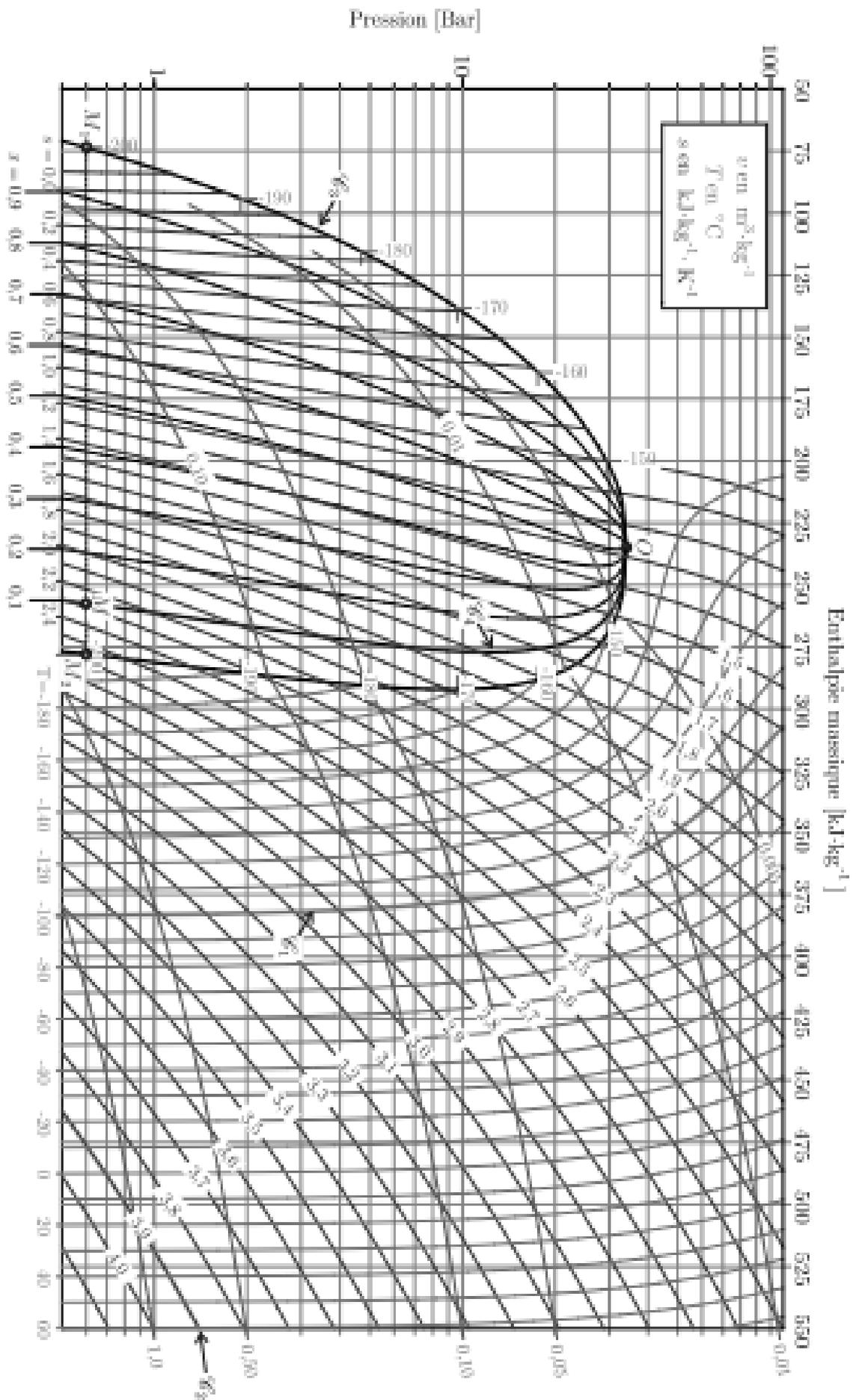


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote

Exercice 03 :

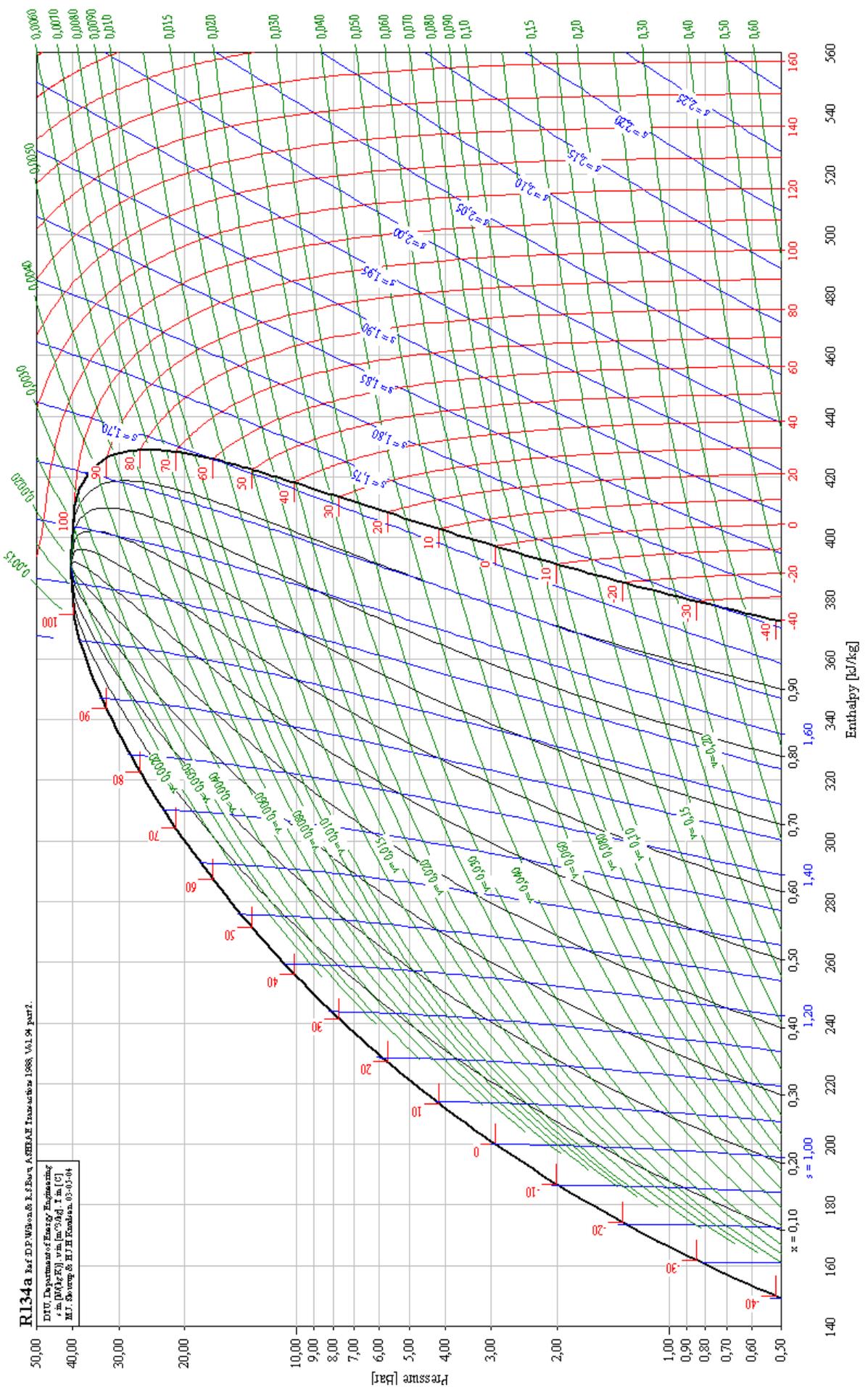
Cycle de LINDE avec pré-refroidissement

Déterminer la fraction y , le travail par unité de masse comprimée, travail par unité de masse liquéfié et la FOM pour les systèmes *simples* et *pré-refroidis de J-T*, en utilisant l'azote comme fluide de travail et en exploitant les données du premier exercice. Et on suppose que la température du gaz non liquéfié à la sortie de deuxième échangeur égale à celle du gaz à la sortie du premier échangeur du cycle de pré-refroidissement $T_3 = 170$ (K). Et la température au point (4), $T_4 = 138$ (K)

Admettant que, pour le système de réfrigération (pré-refroidissement) le fréon R134a comme réfrigérant avec un rapport $X = 0,07$.

Sur le diagramme Enthalpie tracer le cycle de réfrigération caractérisé par les données suivantes :

Les valeurs de deux pression H_p et B_p successivement : 20 bar et 4 bar, l'écart de la surchauffe $\Delta T_{sch} = 10^\circ C$ et l'enthalpie à l'entrée de deuxième détenteur $h_{Ed} = 290$ kJ/kg



R134a Prof. Dr. P. W. Rind and Dr. E. W. A. Schmitt, Transac. ASHRAE, 1988, Vol. 94, part 2.
DTU, Department of Energy Engineering
x in [0(kg F)] vs. [m³/kg], y in [°C]
Prof. Sørensen & DTU, København, 03-05-04

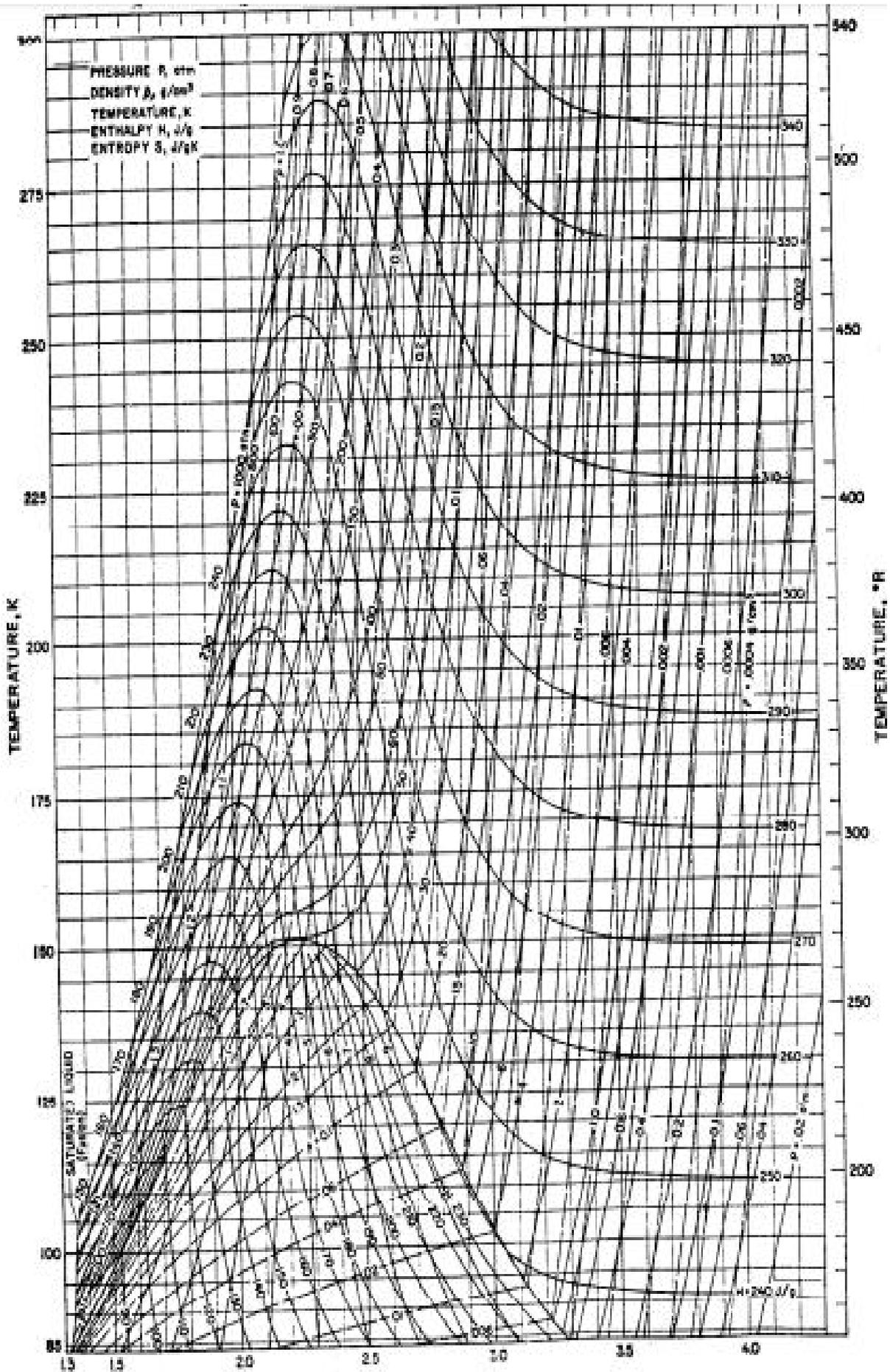
Exercice N°4 :

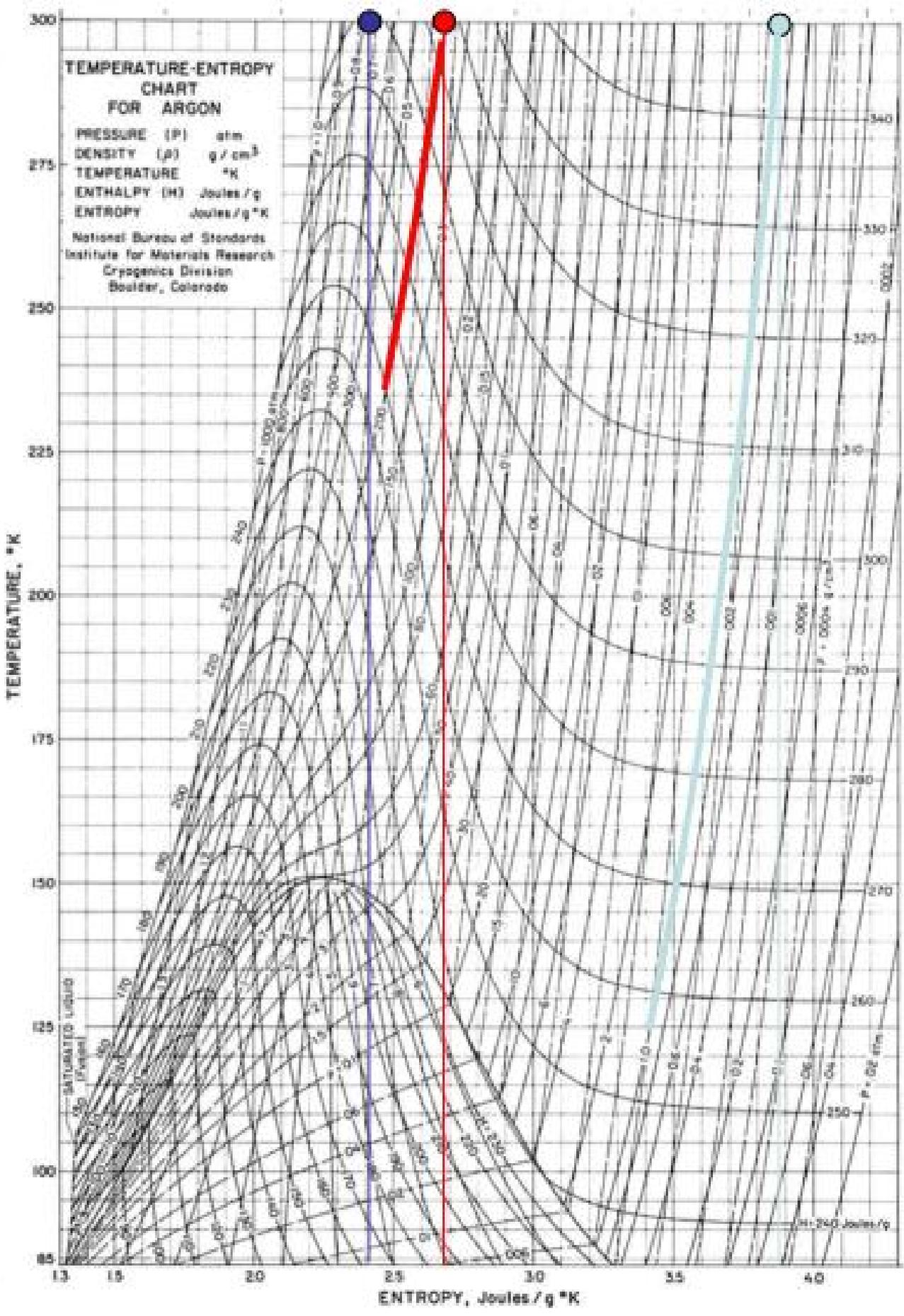
Cycle de Linde à double Pression

Déterminer les termes W/m_f et FOM pour un système de Linde à double Pression avec de l'Argon comme fluide de travail pour les pressions intermédiaires suivantes. Le système fonctionne entre $T= 300(K)$; $P_1 = 1(atm)$ et $P_3=600 (atm)$. Le rapport de masse intermédiaire Z est de 0,6. La température d'ébullition d'argon = 87,28 (K)

Cas	Pr Int au pts 2
I	50 atm
II	100 atm
III	150 atm
IV	200 atm

- Répétez le problème ci-dessus pour $Z = 0,7$. Tracer graphiquement les cycles





Exercice N°5 :

Cycle de Claude

Déterminer les termes Y et W/m_f pour le cycle de Claude fonctionne avec N_2 comme fluide du travail, les deux valeurs opérationnelles de pression $P_1= 1\text{bar}$ et $P_2= 50\text{ bar}$, la compression s'effectuer à température constante $T= 290(\text{K})$ et celle à la sortie du premier échangeur $T_3= 225(\text{K})$.

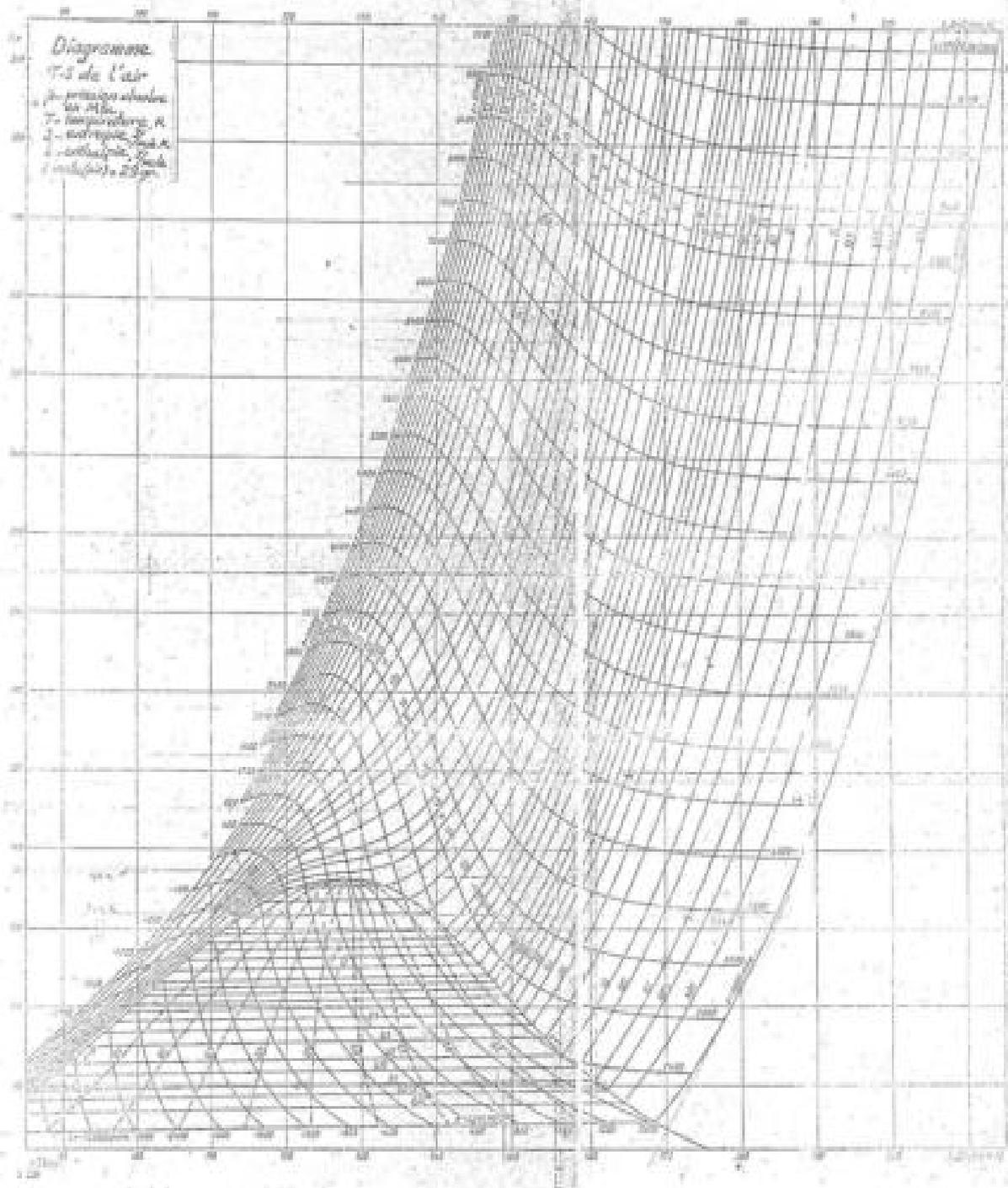
- Tracer le cycle sur la diagramme (T-S).
- Répéter les calculs pour les valeurs de température T_3 et le taux de masse Z suivantes :

$T_3(\text{K})$	280	270	260
-----------------	-----	-----	-----

Z	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- Tracer les graphes $Y= f(Z)$ et $W/m_f=(Z)$, commenter les résultats

Diagramme
 T-3 de l'air
 A. température
 B. humidité
 C. pression
 D. altitude
 E. densité



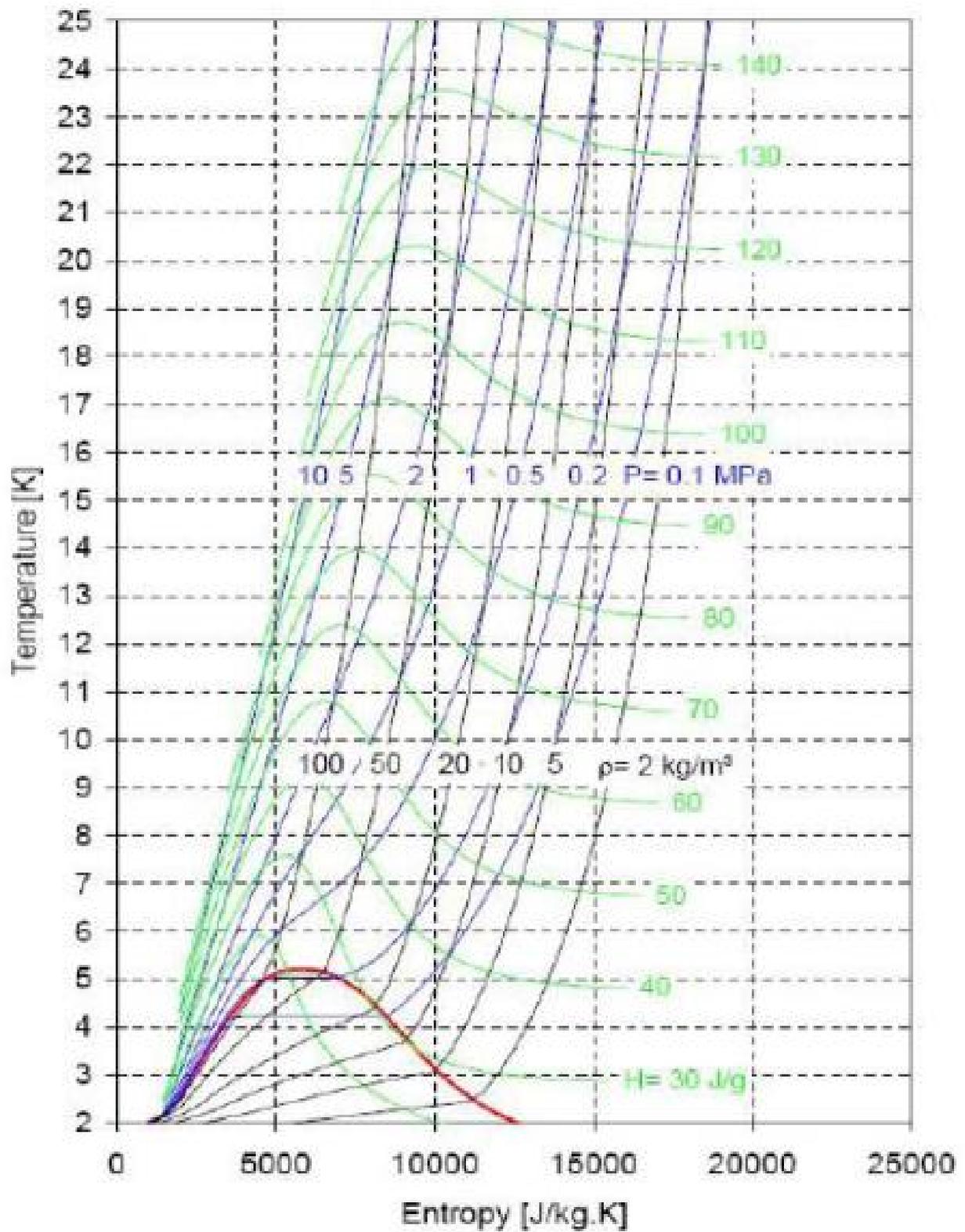


Diagramme entropique d'Hélium

Table 3.1. Ideal-work requirements for liquefaction of gases beginning at 300 K (80°F) and 101.3 kPa (14.7 psia)

Gas	Normal Boiling Point		Ideal Work of Liquefaction, $-\dot{W}_d/\dot{m}_f$	
	K	°R	kJ/kg	Btu/lb _m
Helium-3	3.19	5.74	8 178	3 516
Helium-4	4.21	7.58	6 819	2 931
Hydrogen, H ₂	20.27	36.5	12 019	5 167
Neon, Ne	27.09	48.8	1 335	574
Nitrogen, N ₂	77.36	139.2	768.1	330.2
Air	78.8	142	738.9	317.7
Carbon monoxide, CO	81.6	146.9	768.6	330.4
Argon, A	87.28	157.1	478.6	205.7
Oxygen, O ₂	90.18	162.3	635.6	273.3
Methane, CH ₄	111.7	201.1	1 091	469
Ethane, C ₂ H ₆	184.5	332.1	353.1	151.8
Propane, C ₃ H ₆	231.1	416.0	140.4	60.4
Ammonia, NH ₃	239.8	431.6	359.1	154.4

Annexe 06 : travail idéal pour la liquéfaction des différents gaz à 300 K et 1 bar

GAZ		Température d'ébullition en [K]
Hélium3		3.19
Hélium4		4.21
Hydrogène	H ₂	20.27
Néon	Ne	27.09
Azote	N ₂	77.36
Air		78.8
Argon	Ar	87.28
Oxygène	O ₂	90.18