

DM 6 – Diagrammes d'état : fonctionnement d'un congélateur

I Étude du cycle d'un congélateur à ammoniac

On s'intéresse au fonctionnement d'un congélateur. Il s'agit d'une machine thermique ditherme de type réfrigérateur.

Un choix possible de fluide caloporteur est l'ammoniac NH_3 .

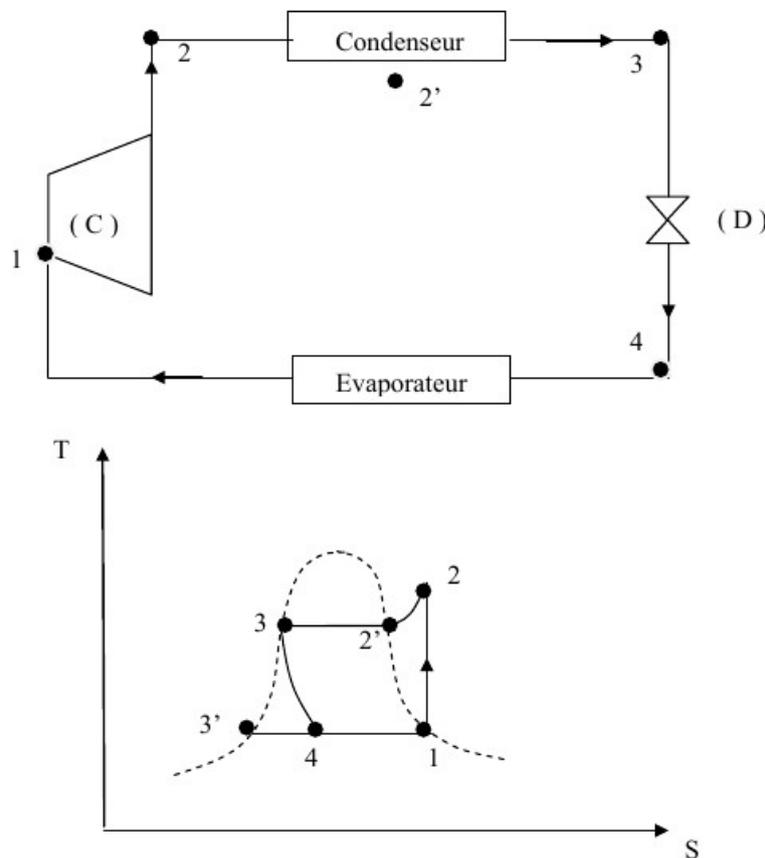
- 1 - a - L'azote est l'élément de numéro atomique $Z = 7$. Donner la configuration électronique d'un atome d'azote.
- b - Rappeler la règle du duet et de l'octet.
- c - Tracer le schéma de Lewis de la molécule d'ammoniac.

I.1 Étude à l'aide des modèles du gaz parfait et de la phase condensée incompressible indilatable

Dans cette sous-partie on utilisera le modèle du gaz parfait pour l'ammoniac vapeur, et le modèle de la phase condensée incompressible indilatable pour l'ammoniac liquide.

La figure ci-dessous présente le cycle décrit par le fluide ammoniac en circulation dans un congélateur. La courbe correspondante est représentée en coordonnées (T, s) .

La courbe de saturation est représentée en pointillés.



Le compresseur (C), alimenté électriquement, aspire la vapeur sèche d'ammoniac dans l'état (1) et l'amène à l'état (2).

La vapeur passe par un état (2') dans le condenseur qui l'amène ensuite jusqu'à l'état (3), liquide saturant, puis elle subit une détente isenthalpique à travers le détendeur (D) jusqu'à l'état (4).

A l'état (4), le liquide est partiellement liquéfié et on note x_4 le titre massique en vapeur.

Enfin, l'évaporateur ramène l'ammoniac à l'état de vapeur sèche.

On retient les hypothèses simplificatrices suivantes : les transformations 2' → 3 et 4 → 1 sont isothermes et isobares. La transformation 2 → 2' est isobare.

On donne : $T_1 = 265 \text{ K}$, $T_3 = 300 \text{ K}$, $p_1 = 3.0 \text{ bars}$, $p_2 = 10 \text{ bars}$, $r = R/M = 489 \text{ S.I.}$ avec R la constante des gaz parfaits et M la masse molaire de l'ammoniac, et $\gamma = 1.3$ le coefficient adiabatique.

On rappelle que pour un gaz parfait la capacité thermique massique à volume constant s'écrit

$$c_v = \frac{r}{\gamma - 1},$$

et celle à pression constante $c_p = \gamma c_v$.

On négligera toute différence d'énergie cinétique ou d'altitude. Il n'y a pas de parties mobiles dans l'évaporateur ou le condenseur.

2 - a - Exprimer puis calculer T_2 . (On doit trouver 350 K)

b - Exprimer la variation d'enthalpie lors de la transformation 33'4.

On donne la capacité thermique massique de l'ammoniac liquide saturant : $c_L = 5.5 \text{ kJ/kg/K}$ et son enthalpie massique de vaporisation à 265 K sous 3.0 bars : $l_v = 1.3 \text{ MJ/kg}$.

Indices : poser le problème en écrivant ce que l'on connaît (compléter les points d'interrogation) :

$$3 \begin{cases} T_3 = ? \\ p_3 = ? \\ \text{tout liquide} \end{cases} \rightarrow 3' \begin{cases} T_3' = ? \\ p_3' = ? \\ \text{tout liquide} \end{cases} \rightarrow 4 \begin{cases} T_4 = ? \\ p_4 = ? \\ \text{fraction vapeur } x_4 \\ \text{et fraction liquide } (1 - x_4) \end{cases}$$

3 vers 3' est un simple refroidissement d'un liquide, et 3' vers 4 est un changement d'état d'une masse $x_4 m$ de liquide. Il y a des formules pour la variation d'enthalpie dans chaque cas.

En déduire la valeur de x_4 .

c -

Indications pour cette question et la suivante :

L'évaporateur peut être considéré comme un système ouvert, dans lequel entre du fluide dans l'état 4, et ressort du fluide dans l'état 1.

On montrera dans un chapitre ultérieur que le premier principe pour un système ouvert (on dit aussi "le premier principe pour un système en écoulement") peut s'écrire comme $\Delta h = w_i + q$, avec h l'enthalpie massique du fluide, $\Delta h = h_{\text{fluide sortant}} - h_{\text{fluide entrant}}$, q le transfert thermique massique reçu par le fluide lors de sa traversée de l'évaporateur, et w_i le travail massique indiqué reçu par le fluide de la part des parties mobiles du composant. On a $w_i = 0$ dans l'évaporateur (pas de parties mobiles).

Déterminer le transfert thermique massique q_{41} reçu par le fluide de la part du milieu extérieur lors de sa traversée de l'évaporateur.

Indice : pour Δh , c'est encore un changement d'état.

d - De la même façon, mais en considérant cette fois le compresseur comme un système ouvert, déterminer le travail massique indiqué $w_{i,\text{comp}}$ reçu par le fluide dans le compresseur.

e - En déduire l'efficacité de ce congélateur. Faire l'application numérique.

Identifier la grandeur utile : c'est le transfert thermique prélevé à la source froide, donc sur quelle étape ceci a-t-il lieu ?

Identifier la grandeur coûteuse : le travail fourni par le compresseur.

I.2 Étude à l'aide d'un diagramme expérimental du fluide ammoniac

Jusqu'ici, pour étudier le fonctionnement du congélateur nous avons supposé que l'ammoniac en phase vapeur se comporte comme un gaz parfait. Il s'agit d'une hypothèse qui nous a permis de faire les calculs et d'estimer en particulier T_2 , le titre en vapeur dans l'état 4 x_4 , le travail fourni par le compresseur, le transfert thermique q_{41} et enfin l'efficacité e .

Nous allons maintenant déterminer ces grandeurs à l'aide du diagramme T - s expérimental disponible ci-dessous (à rendre avec la copie), et voir à quel point ces valeurs diffèrent de celles calculées dans le cadre du modèle du gaz parfait.

On conserve toutefois les hypothèses qui permettent d'obtenir la forme du cycle, à savoir :

- (i) le changement d'état $4 \rightarrow 1$ se fait toujours à $T_1 = 265 \text{ K}$ (-8°C), et le point 1 est sur la courbe de rosée.
- (ii) l'évolution isobare $2 \rightarrow 3$ se termine en 3 sur la courbe d'ébullition à $T_3 = 300 \text{ K}$ (27°C).
- (iii) $3 \rightarrow 4$ est encore supposée isenthalpique, et (iv) $1 \rightarrow 2$ isentropique.

3 - a - Quelle est l'équation des courbes isenthalpes pour un gaz parfait ?

Dans quelle partie du diagramme T - s de l'ammoniac (en fin de sujet) ceci commence-t-il à être vérifié ?

b - Avec les hypothèses (i) à (iv), tracer le cycle suivi par le fluide dans le diagramme T - s fourni.

c - Déterminer graphiquement la température T_2 .

La comparer au résultat trouvé précédemment à l'aide du modèle du gaz parfait.

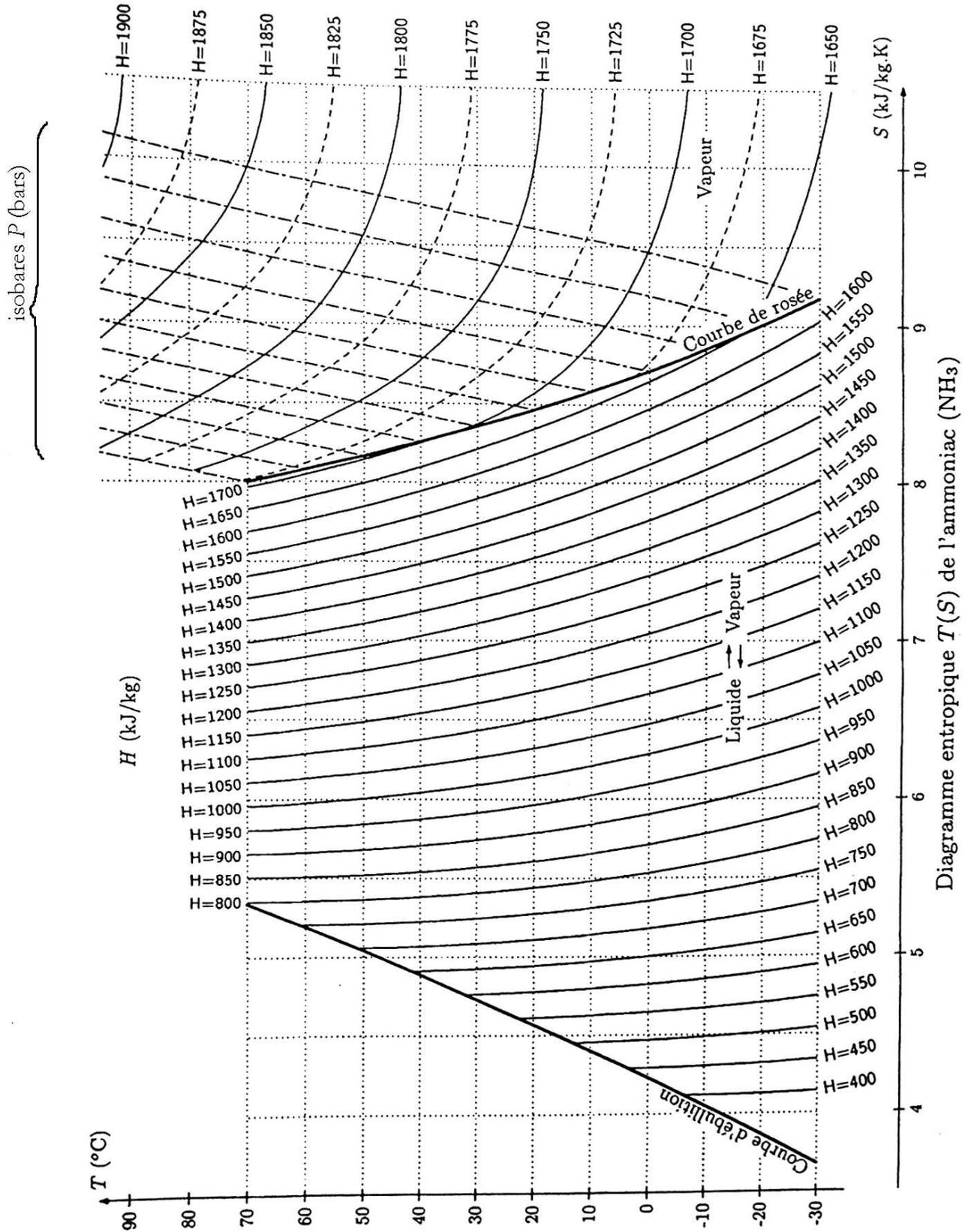
d - À l'aide de la règle des moments, déterminer graphiquement le titre x_4 en vapeur dans l'état 4. On détaillera la démarche.

Le comparer au résultat trouvé précédemment à l'aide du modèle du gaz parfait et commenter.

e - Utiliser le diagramme pour déterminer la valeur $\Delta h = h_1 - h_4$. Ceci donne q_{41} . Comparer à la valeur trouvée précédemment.

f - Utiliser le diagramme pour déterminer la valeur $\Delta h = h_2 - h_1$. Ceci donne $w_{i,\text{comp}}$. Comparer à la valeur trouvée précédemment.

g - Donner enfin la valeur de l'efficacité, et comparer avec la valeur précédente.



II Étude de l'isolation du congélateur

Partie facultative, mais il est bien d'essayer au moins a, b, c, d.

On s'intéresse au fonctionnement d'un congélateur domestique placé dans une cuisine où la température ambiante $T_c = 298 \text{ K}$ est constante.

- 4 - Pour étudier les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du congélateur, on débranche ce dernier. La température intérieure initiale est $T_f = 268 \text{ K}$. Au bout d'une durée $\Delta t = 6.0 \text{ h}$, cette température passe à la valeur $T'_f = 273 \text{ K}$.

La puissance reçue de l'extérieur est de la forme : $\Phi(t) = -aC[T(t) - T_c]$ où $T(t)$ est la température dans le congélateur à l'instant t , $C = 500 \text{ kJ/K}$ la capacité thermique du congélateur et a une constante. On pourra supposer que le congélateur et ce qu'il contient se comporte comme une phase condensée incompressible indilatable de capacité thermique C .

- a - Préciser le signe et l'unité S.I. de la constante a .
- b - Établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.
- c - En déduire la loi $T(t)$.
- d - Compte tenu de la valeur de T'_f , déterminer la valeur numérique de a .
- e - Le congélateur a une efficacité $e = 3$.

Exprimer, en fonction de a , C , e , T_c et T_f , la puissance à fournir au moteur pour maintenir la température dans le congélateur constante et égale à T_f . La calculer.