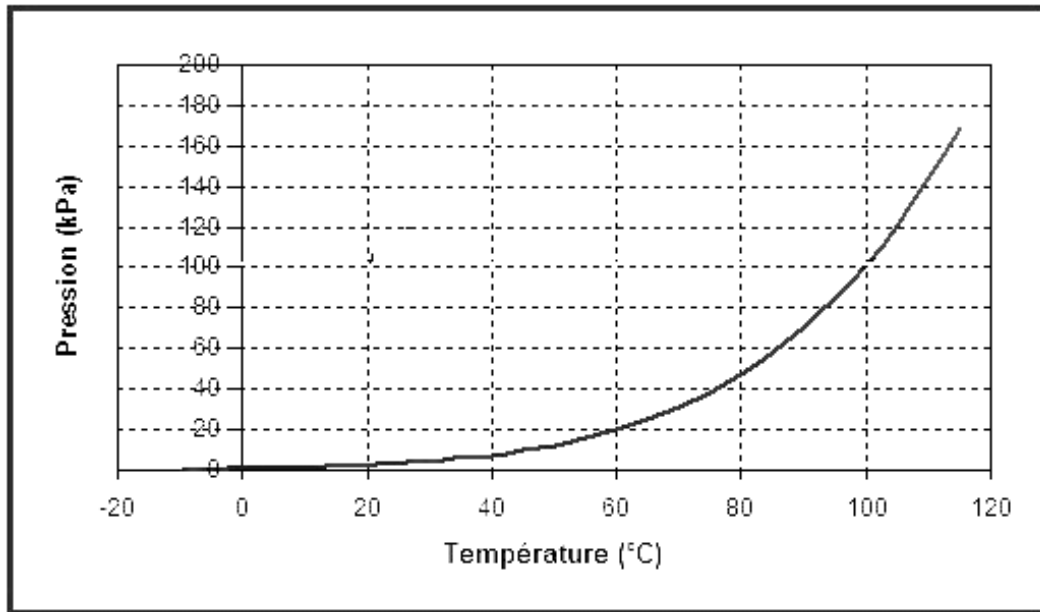


Application directe du cours

**Exercice 1** Pression de vapeur saturante



La courbe ci-dessus représente l'évolution de la pression de vapeur saturante  $P_{\text{sat}}(T)$  de l'eau en fonction de la température.

- 1 ) Pour une température de 50°C, sous quelle pression l'eau commence-t-elle à bouillir ?
- 2 ) Estimer la température d'ébullition de l'eau en haut du Mont-Blanc (altitude : 4809 m). *On rappelle l'expression obtenue pour la pression dans l'atmosphère isotherme :* 
$$P(z) = P_0 e^{-\frac{M_{\text{air}} g z}{RT_0}}$$

Pour la suite de l'exercice, on s'intéresse à la vaporisation et à la condensation de l'eau au contact de l'air. C'est alors la pression partielle  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  qui doit être prise en compte :

- si  $P_{\text{H}_2\text{O}} < P_{\text{sat}}(T)$ , l'eau liquide se vaporise (il ne s'agit pas d'ébullition mais d'évaporation)
- si  $P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{sat}}(T)$ , il y a équilibre entre le liquide et la vapeur (air saturé en vapeur d'eau)
- si  $P_{\text{H}_2\text{O}} > P_{\text{sat}}(T)$ , la vapeur se condense

- 3 ) Comparer les pressions de vapeur saturante de l'eau à 10°C et 37°C. Que se passe-t-il lorsque de l'air à 37°C saturé en vapeur d'eau subit un refroidissement brutal à 10°C ? Peut-on observer ce phénomène facilement ?

**Exercice 2** Utilisation qualitative du diagramme (P,v)

- 1 ) Rappeler l'allure du diagramme (P,v) d'un fluide : indiquer la courbe de rosée, la courbe d'ébullition, le point critique, puis placer les domaines du liquide, de la vapeur et du mélange diphasé. Représenter également quelques isothermes.

Une enceinte de volume  $V$  fixé contient une masse  $m$  d'un fluide pur en équilibre sous deux phases (liquide et vapeur).

- 2 ) Exprimer le volume massique  $v$  du fluide en fonction de  $V$  et  $m$ . Quel est la relation (simple) entre  $v$  et  $\mu$  (masse volumique du fluide) ?
- 3 ) Dans un diagramme (P,v), tracer l'allure d'un chauffage à volume constant dans le cas  $v < v_c$ , puis dans le cas  $v > v_c$  ( $v_c$  représente le volume massique du point critique) :
- 4 ) Pour une bouteille de butane (volume fixe) placée à proximité d'une source de chaleur, lequel des deux cas précédents présente le plus grand risque de destruction ?

**Exercice 3** Représentation de transformations

Pour chacune des transformations, représenter l'allure dans un diagramme (P,v) puis dans un diagramme (T,s).

- 1 ) Transformation isobare : échauffement d'un liquide jusqu'à sa température d'ébullition, vaporisation totale, puis échauffement de la vapeur sèche
- 2 ) Compression isotherme d'une vapeur sèche jusqu'à sa condensation totale

**Exercice 4** Enthalpies massiques de changement d'état

Pour un fluide utilisé dans une machine frigorifique, l'enthalpie massique de vaporisation est de l'ordre de 200 kJ.kg<sup>-1</sup> pour une pression de quelques bar. On considère un échantillon de 150 g de ce fluide.

- 1 ) Si l'échantillon est initialement à l'état de liquide saturant, quel transfert thermique faut-il lui apporter pour le vaporiser totalement ?
- 2 ) Si l'échantillon se trouve initialement à l'état de vapeur saturante, quelle énergie peut-il céder par transfert thermique si l'on provoque sa condensation totale ?
- 3 ) L'échantillon est sous forme de liquide saturant ; on lui apporte 20 kJ par chauffage isobare. Préciser la nature (liquide, vapeur ou mélange) et éventuellement la composition (x<sub>v</sub>) de l'état final.

**Exercice 5** Règle des moments

On étudie le fluide SF6 sous forme de mélange diphasé à T = 24°C. La masse totale de fluide m = 0,20 g occupe un volume V = 0,5 cm<sup>3</sup>. A cette température, les volumes massiques du liquide et de la vapeur sont respectivement v<sub>L</sub> = 0,125 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> et v<sub>V</sub> = 5,5 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>

- 1 ) Calculer le volume massique v du mélange à partir des données.
- 2 ) En déduire le titre massique en vapeur du mélange grâce à la règle des moments.
- 3 ) Déterminer le volume occupé par chacune des phases.

**Exercice 6** La bouteille de "gaz"

La bouteille de propane étudiée ici, de volume V = 45 L, contient 13 kg de ce combustible. La température à l'intérieur de la bouteille est supposée égale à la température extérieure T<sub>ext</sub> = 25 °C.



Données pour le propane :

P<sub>sat</sub>(25°C) = 10 bar ; μ<sub>liquide</sub> = 5,8.10<sup>2</sup> kg.m<sup>-3</sup> ; μ<sub>gaz</sub> = 18 kg.m<sup>-3</sup> (à 25°C et sous 10 bar)

- 1 ) En utilisant les masses volumiques fournies ci-dessus, calculer v<sub>L</sub> (25°C) et v<sub>V</sub> (25°C).
- 2 ) Calculer le volume massique v du propane dans la bouteille. En déduire s'il se trouve sous forme de liquide, de vapeur, ou d'un mélange diphasé (le cas échéant, déterminer sa composition).

Lorsque la bouteille est presque vide, on constate en l'agitant qu'il n'y a plus de phase liquide.

- 3 ) A l'instant où la dernière goutte de propane liquide disparaît, quelle est la masse de propane contenue dans la bouteille ? Pendant combien de temps pourra-t-on encore alimenter un brûleur de 2000 W ?

Données M(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) = 44 g.mol<sup>-1</sup>      Δ<sub>r</sub>H<sup>0</sup> = -2220 kJ.mol<sup>-1</sup> pour la combustion du propane

Travaux dirigés

**Exercice 7** Lecture et exploitation du diagramme (T,s) de l'eau (en annexe)

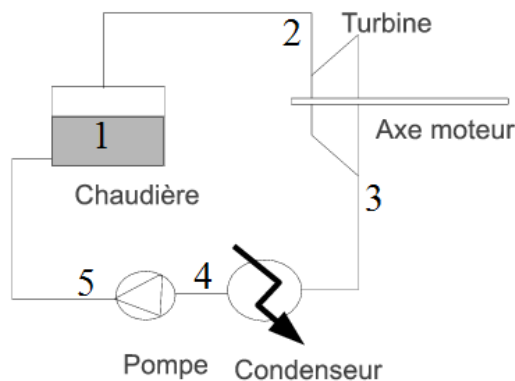
Pour commencer, une lecture directe du diagramme est suffisante.

- 1 ) Sous une pression de 10 bar, quelle est la température de vaporisation de l'eau ( $T_{\text{vap}}(10 \text{ bar})$ ) ?
- 2 ) Quelle est la valeur de l'entropie massique de la vapeur d'eau saturante ( $s_V$ ) sous 1 bar ?
- 3 ) Pour le liquide saturant à 340 °C, quelle est la valeur de l'enthalpie massique ( $h_L$ ) ?
- 4 ) Pour le point A, évaluer  $T_A$ ,  $P_A$ , l'entropie massique ( $s_A$ ) et l'enthalpie massique ( $h_A$ )

Pour la suite, des calculs sont nécessaires...

- 5 ) Quelle est la valeur du titre massique en vapeur  $x_V$  au point A ? au point B ? au point C ? au point D ?
- 6 ) Quelle est la valeur de l'entropie massique de vaporisation à 200 °C ( $\Delta_{\text{vap}}$ ) ?
- 7 ) Quelle est la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation à 200 °C ( $l_{\text{vap}}$ ) ?
- 8 ) Déterminer  $\Delta_{\text{vap}}(300^\circ\text{C})$  et  $l_{\text{vap}}(300^\circ\text{C})$ .

**Exercice 8** Cycle industriel

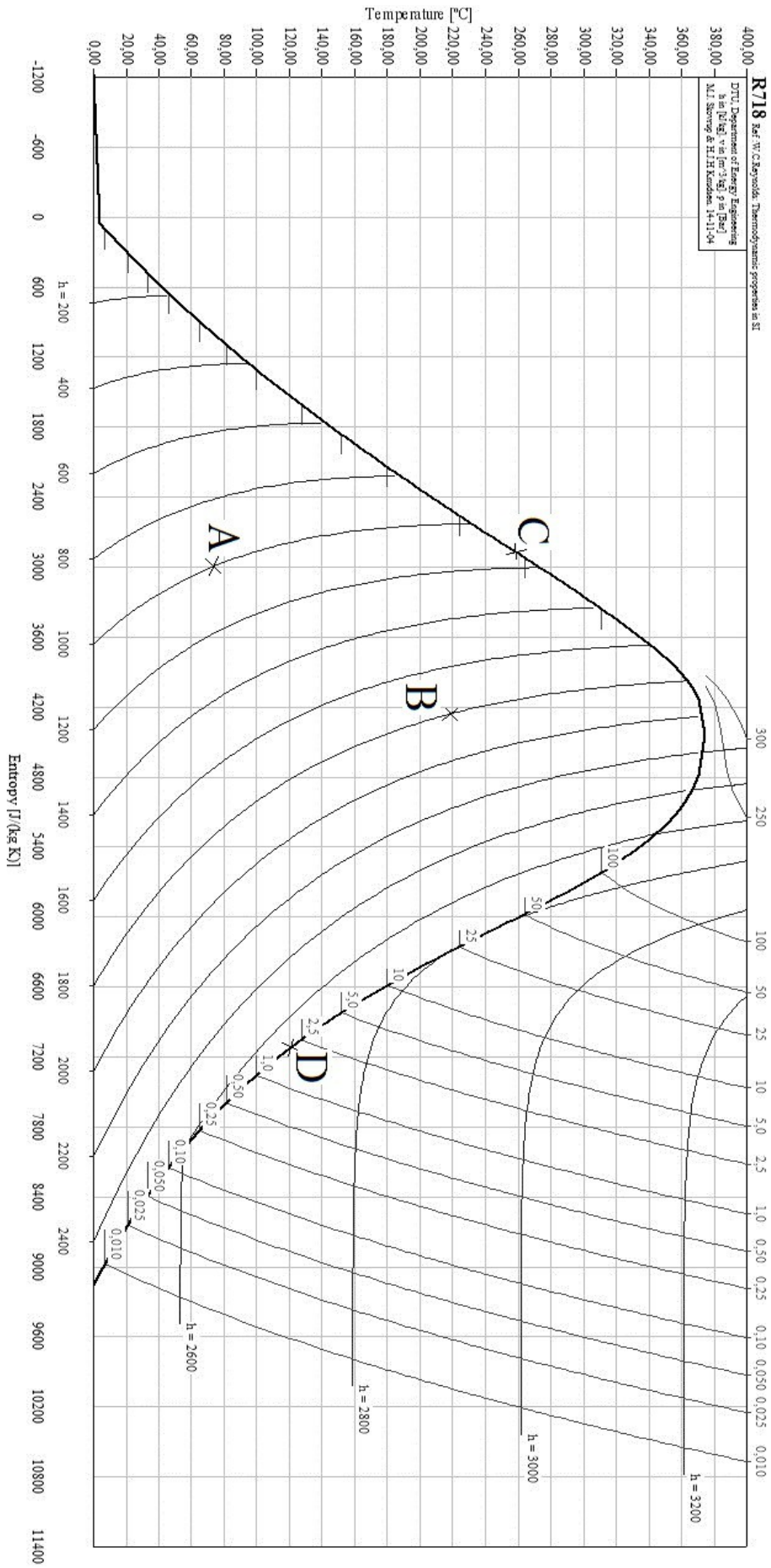


Le cycle subi par l'eau dans une centrale thermique est modélisé comme suit :

- 1 : liquide saturant,  $P = 50 \text{ bar} \Rightarrow$  (chauffage isobare dans la chaudière)  $\Rightarrow 2$
- 2 : vapeur saturante  $\Rightarrow$  (détente adiabatique réversible dans la turbine)  $\Rightarrow 3$
- 3 : mélange L/V  $\Rightarrow$  (refroidissement isobare dans le condenseur)  $\Rightarrow 4$
- 4 : liquide saturant,  $P = 0,05 \text{ bar} \Rightarrow$  (compression adiabatique réversible dans la pompe)  $\Rightarrow 5$
- 5 : état liquide,  $P = 50 \text{ bar} \Rightarrow$  (chauffage isobare dans la chaudière)  $\Rightarrow 1$

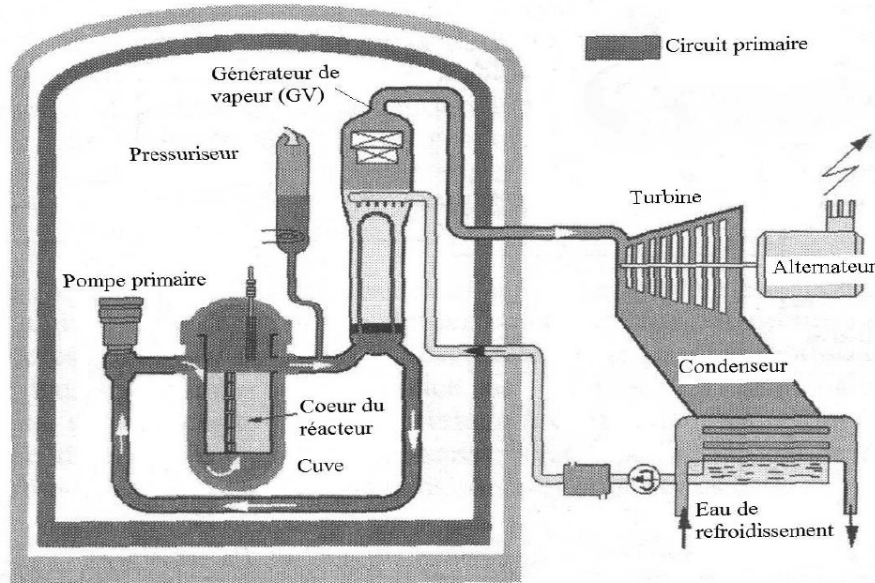
- 1 ) Que vaut la variation d'entropie massique  $\Delta s$  au cours d'une transformation adiabatique réversible ?
- 2 ) Placer les différents états sur le diagramme (T,s) de l'eau (indication pour l'état 5 : les isobares pour le liquide dans le diagramme (T,s) sont très proches de la courbe d'ébullition).
- 3 ) Le cycle est-il moteur ou récepteur ?

# P5 - Diagrammes d'état des fluides - TD



**Exercice 9** Cycle d'un sous-marin nucléaire

Un réacteur nucléaire fournit de l'énergie grâce à la fission nucléaire de combustible tel que l'uranium (circuit primaire). Cette énergie permet de vaporiser de l'eau entraînant une turbine couplée à un alternateur (figure 3 page suivante). Celui-ci produit de l'électricité pour alimenter un moteur électrique faisant tourner l'hélice du sous-marin.



L'eau entre dans la pompe sous forme de liquide saturé (état 1), puis est comprimée de façon isentropique (adiabatique réversible) à la pression qui règne dans le générateur de vapeur (GV). En entrant dans le GV, l'eau se trouve sous forme de liquide comprimé à la pression  $P_2$  (état 2). Elle en ressort sous forme de vapeur (état 3) à la même pression  $P_2$  puis pénètre dans la turbine où elle se détend de façon isentropique (adiabatique réversible) en entraînant l'arbre de l'alternateur. A la sortie de la turbine (état 4), l'eau est diphasée. Ce mélange liquide-vapeur est alors liquéfié à pression constante dans le condenseur et en sort dans l'état 1.

On a placé sur le diagramme (T,s) de l'eau (page suivante) les états 1 et 2.  
On donne  $P_2 = 50 \cdot 10^5$  Pa,  $P_1 = 10^5$  Pa,  $T_3 = 773$  K ( $500^\circ\text{C}$ ).

- 1 ) Placer les états 3 et 4 sur le diagramme (T,s) de l'eau (en annexe) et tracer le cycle subi par l'eau.
- 2 ) En utilisant le diagramme, indiquer les valeurs numériques de  $T_1$ ,  $h_3$ ,  $h_4$ ,  $s_4$ ,  $s_V(T_1)$  entropie massique de la vapeur saturante à  $T_1$ , et  $s_L(T_1)$  entropie massique du liquide saturant à  $T_1$ .
- 3 ) Déduire de la question précédente la valeur numérique du titre massique en vapeur  $x_4$  à la sortie de la turbine.
- 4 ) Afin de limiter la corrosion des aubes, le mélange qui sort de la turbine ne doit pas contenir plus de 10% d'eau liquide (en masse). Cette contrainte est-elle respectée pour le cycle décrit ici ?
- 5 ) Jusqu'à quelle température  $T_3'$  faudrait-il chauffer la vapeur si l'on souhaitait éviter totalement la présence d'eau liquide à la sortie de la turbine ?

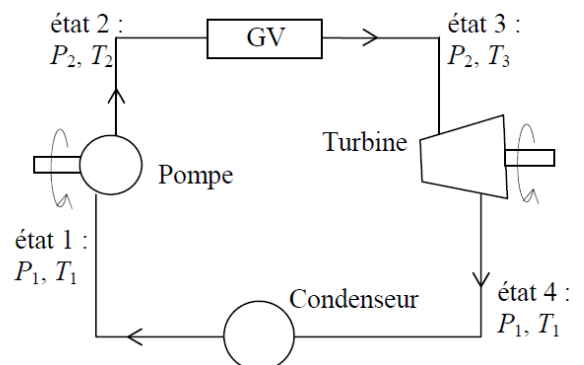
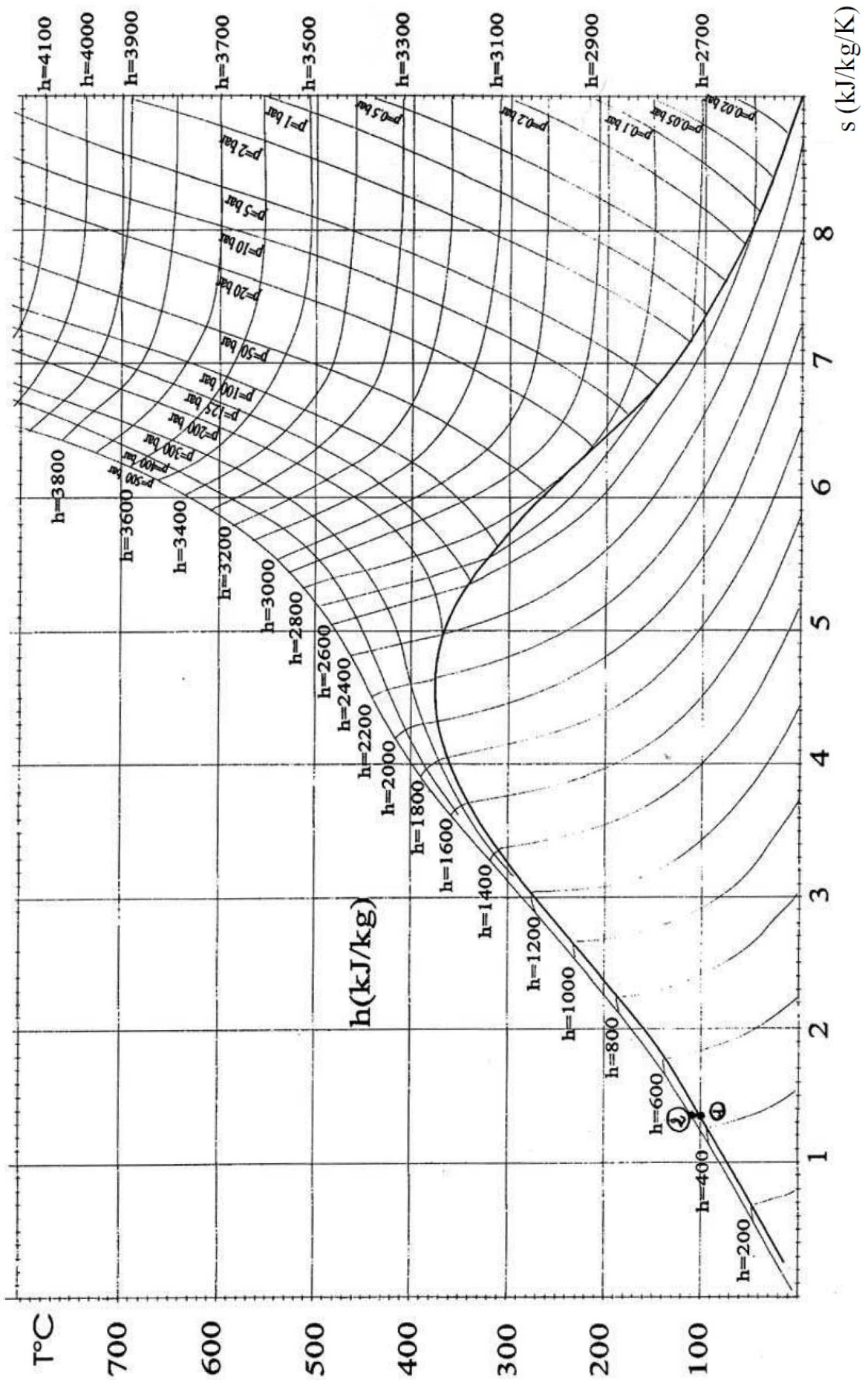


Diagramme T - S de l'eau



On désire étudier le procédé de Linde de liquéfaction du méthane, utilisé par exemple dans l'usine de Snøhvit en Norvège, schématisé figure 1 avec les différents états du fluide numérotés de 0 à 10, permettant d'obtenir un débit massique  $D_{m10}$  de méthane liquide saturant à la pression  $P_{10} = 1 \text{ bar}$  à une température  $T_{10} = -161,7 \text{ °C}$  (état 10).

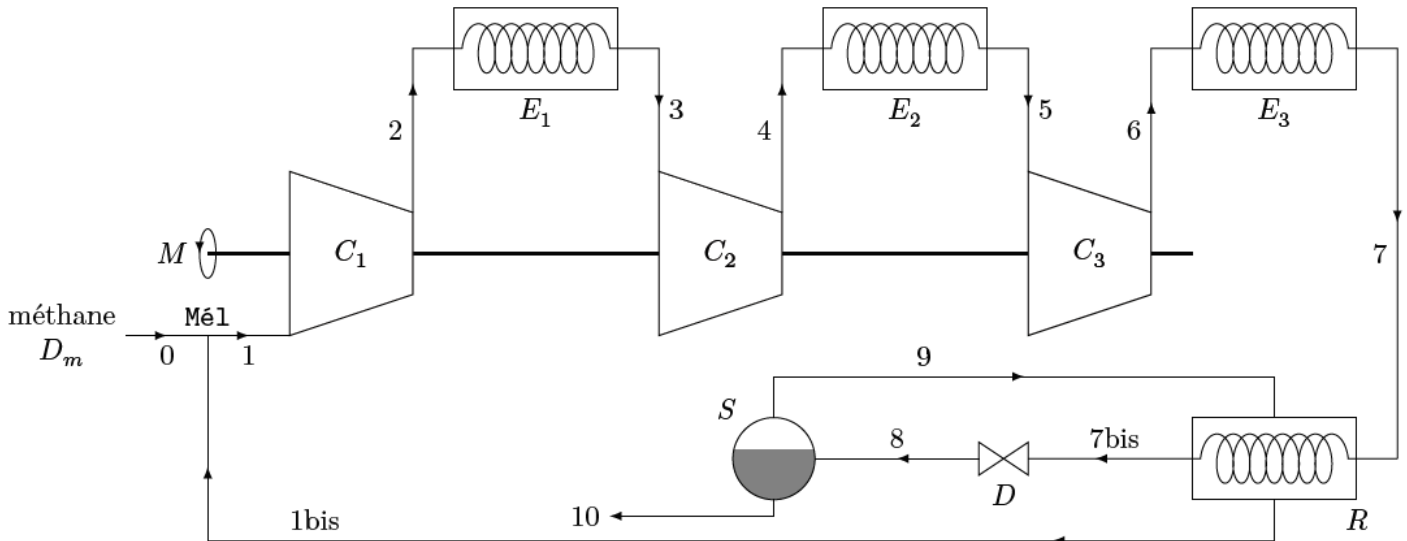


Figure 1 Installation de Linde de liquéfaction du méthane

Pour cela, on introduit un débit massique  $D_m = 1,0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  de méthane gazeux à la température  $T_0 = 7,0 \text{ °C}$  et à la pression  $P_0 = 1,0 \text{ bar}$  (état 0). Trois compresseurs  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  fonctionnant de façon adiabatique et réversible, solidaires d'un même arbre entraîné sans perte par un moteur  $M$ , ainsi que trois échangeurs de chaleurs isobares (systèmes de refroidissement)  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$  permettent d'obtenir en l'état 7 du gaz à la pression  $P_7 = 100 \text{ bar}$  et à la température  $T_7 = -63 \text{ °C}$ . Les pressions intermédiaires sont égales à  $P_2 = 5,0 \text{ bar}$  et  $P_4 = 25 \text{ bar}$ . L'enthalpie massique du fluide dans l'état 3 est  $h_3 = 866 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  et dans l'état 5,  $h_5 = 840 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Un régénérateur  $R$ , échangeur thermique globalement calorifugé et fonctionnant de façon réversible, permet de refroidir le gaz comprimé non plus à  $-63 \text{ °C}$  mais à  $-82 \text{ °C}$  (état 7bis). Ce gaz refroidi est détendu isenthalpiquement de 100 bar à 1 bar par le détendeur  $D$  jusqu'à l'état diphasé 8 de titre massique en vapeur  $x = 0,61$ . Les phases liquide et gazeuse sont séparées dans le séparateur isobare  $S$ . La vapeur saturante sèche sortant du séparateur est recyclée dans le régénérateur  $R$ . Mé1 est un mélangeur globalement calorifugé, sans partie mobile et fonctionnant de façon isobare. La pression en 1 vaut donc  $P_1 = 1 \text{ bar}$ .

On se place en régime permanent d'écoulement. On négligera toute variation d'énergie mécanique du fluide.

1) On note respectivement les débits massiques de fluide  $D_{m1}$  et  $D_{m1bis}$  aux états 1 et 1bis. En utilisant le titre massique en vapeur  $x$  dans le séparateur, établir une relation entre  $D_{m1}$ ,  $D_{m1bis}$  et  $x$ . Après avoir traduit la conservation du débit massique au niveau du mélangeur, déterminer les valeurs des débits massiques  $D_{m1}$  et  $D_{m1bis}$ .

2) Déterminer graphiquement les enthalpies massiques aux états 7 ( $P_7 = 100 \text{ bar}$  et  $T_7 = -63 \text{ °C}$ ), 7bis ( $P_{7bis} = P_7$ ,  $T_{7bis} = -82 \text{ °C}$ ) et 9 respectivement notées  $h_7$ ,  $h_{7bis}$  et  $h_9$ . En effectuant un bilan énergétique au niveau du régénérateur  $R$  globalement calorifugé et ne comportant pas de partie mobile, déterminer l'enthalpie massique  $h_{1bis}$ .

3) On admet qu'au niveau du mélangeur Mé1, il y a conservation du débit d'enthalpie ce qui se traduit par la relation  $D_m h_0 + D_{m1bis} h_{1bis} = D_{m1} h_1$  où  $h_0$ ,  $h_1$  et  $h_{1bis}$  désignent alors respectivement l'enthalpie massique du fluide dans l'état 0, 1 et 1bis. Calculer  $h_1$ .

4) La transformation au niveau du compresseur  $C_1$  étant supposée isentropique, déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique  $h_2$  à l'état 2. En déduire la puissance  $P_{u1}$  fournie par le moteur au compresseur  $C_1$ . On commencera par positionner le point 1 sur le diagramme.

5) La puissance totale délivrée par le moteur est égale à 1,8 MW, quel type de machine motrice peut délivrer une telle puissance ?

Annexe : Diagramme pression – enthalpie massique du corps pur méthane

