

Thermodynamique industrielle

Extrait du programme

L'application des deux principes aux fluides en écoulement stationnaire dans les systèmes ouverts conduit ensuite à l'analyse de quelques systèmes industriels.

La partie 1.6 « Thermodynamique industrielle » permet un approfondissement du cours de première année, par l'étude de cycles industriels. On se limite à des calculs dans le cadre du modèle du gaz parfait ou à l'utilisation des diagrammes d'état si le fluide est réel. Aucune connaissance relative à la technologie des installations ou aux différents types de cycles n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1.6. Thermodynamique industrielle.	
Étude de quelques dispositifs d'une installation industrielle Compresseur et turbine calorifugés	Établir et exploiter la variation d'enthalpie massique pour une transformation réversible.
Échangeur thermique calorifugé.	Établir et exploiter la relation entre les puissances thermiques reçues par les deux écoulements.
Détendeur calorifugé (laminage).	Établir et exploiter la nature isenthalpique de la transformation.
Cycles industriels Moteurs, réfrigérateurs, pompes à chaleur.	Repérer, pour une machine dont les éléments constitutifs sont donnés, les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques. Relier le fonctionnement d'une machine au sens de parcours du cycle dans un diagramme thermodynamique. Exploiter des diagrammes et des tables thermodynamiques pour déterminer les grandeurs thermodynamiques intéressantes. Définir et exprimer le rendement, l'efficacité ou le coefficient de performance d'une machine. Citer des ordres de grandeur de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs.

Sommaire

EXTRAIT DU PROGRAMME	1
SOMMAIRE.....	2
1 ÉTUDE DE QUELQUES DISPOSITIFS D'UNE INSTALLATION INDUSTRIELLE	3
1.1 COMPRESSEUR ET TURBINE CALORIFUGES	3
1.2 ÉCHANGEUR THERMIQUE CALORIFUGE	5
1.3 DETENDEUR CALORIFUGE (LAMINAGE).....	6
2 CYCLES INDUSTRIELS	7
2.1 MACHINES THERMIQUES.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2.2 MOTEURS THERMIQUES.....	8
2.3 REFRIGERATEURS ET POMPES A CHALEUR.....	12
3 QUESTIONS DE COURS	17
4 DM POUR LE 21/11/2022	18
4.1 CENTRALE TSI 2021.....	18

Ce chapitre va permettre de reprendre les résultats vus en thermodynamique différentielle avec ou sans changement d'état pour les systèmes ouverts afin d'étudier les machines thermiques en utilisant les diagrammes thermodynamiques. Nous reverrons aussi les bases sur les machines thermiques vues en TS11.

1 Étude de quelques dispositifs d'une installation industrielle

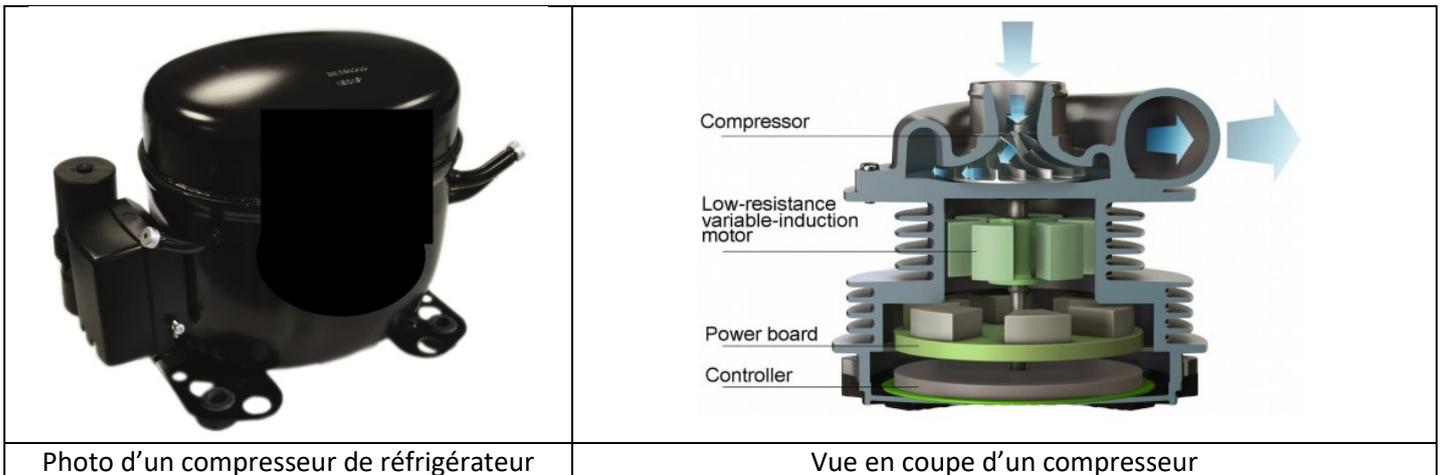
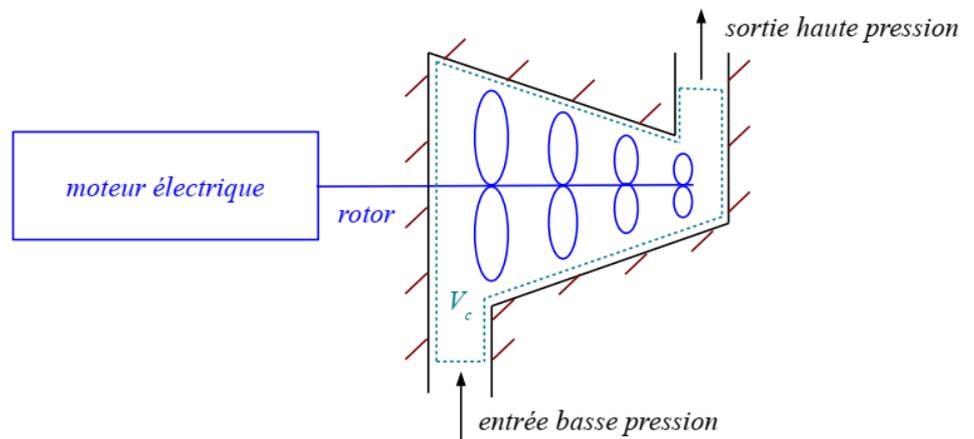
- 1) Rappeler le premier et deuxième principes industriels (système ouvert) pour un écoulement stationnaire. Quels sont les termes qui sont en général négligés dans le premier principe énoncé ?

1.1 Compresseur et turbine calorifugés

1.1.1 Compresseur

Un compresseur transmet, via son arbre entraînant en rotation une roue à aubes, ou via un piston, un travail mécanique indiqué $w_{i,comp}$ au fluide pour en augmenter la pression. Lorsqu'il s'agit de compresser un liquide, on parle aussi de pompe.

Pour se faire, le rotor d'un moteur électrique (en général) est directement relié à des pales (ou autres pièces mobiles).



On considère un compresseur calorifugé.

- Réécrire le premier principe industriel en fonction de $w_{i,comp}$. Commenter son signe.
- Si on suppose, de plus, la transformation réalisée dans le compresseur réversible. Comment se simplifie le deuxième principe ? Comment appelle-t-on ce type de transformation ?
- Dans le cas où le fluide est un gaz parfait de capacité thermique massique c_p , comment peut-on relier $\Delta h = h_S - h_E$ aux températures en entrée T_E et en sortie T_S du compresseur ? Comparer les températures.
- Dans le cas où le fluide est un gaz parfait (rapport γ) et la transformation adiabatique réversible, relier les températures et pressions en entrée (T_E, P_E) et en sortie (T_S, P_S). Vérifiez la compatibilité de l'expression obtenue avec la question précédente.

Remarque :

La compression d'un gaz peut entraîner sa liquéfaction partielle, phénomène, en général, à éviter.

La compression peut se faire, en plusieurs étapes (compression étagée) pour améliorer le rendement.

1.1.2 Turbine

Une turbine permet d'utiliser l'énergie totale d'un écoulement pour mettre en rotation une roue à aubage solidaire d'un arbre et récupérer ainsi un travail mécanique indiqué $w_{i,turb}$. Contrairement au compresseur, c'est donc ici le fluide qui met en mouvement une partie mécanique. En sortie, sa pression aura donc diminué.

On peut distinguer différents types de turbines :

- turbines à gaz (dans un turboréacteur par exemple)
- turbines hydrauliques (dans les centrales nucléaires, électriques ou barrages).

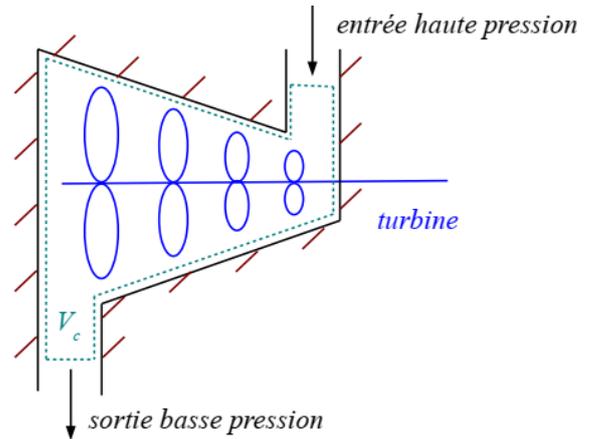


Photo d'une turbine de centrale nucléaire



Photo d'une turbine à vapeur

On considère une turbine calorifugée.

- 6) Réécrire le premier principe industriel en fonction de $w_{i,turb}$. Commenter son signe.
- 7) Dans le cas où le fluide est un gaz parfait de capacité thermique massique c_p , comment peut-on relier $\Delta h = h_S - h_E$ aux températures en entrée T_E et en sortie T_S de la turbine ? Comparer les températures.
- 8) Retrouver dans le cas d'une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait que la pression en sortie P_S est plus faible que la pression en entrée P_E .

Remarque :

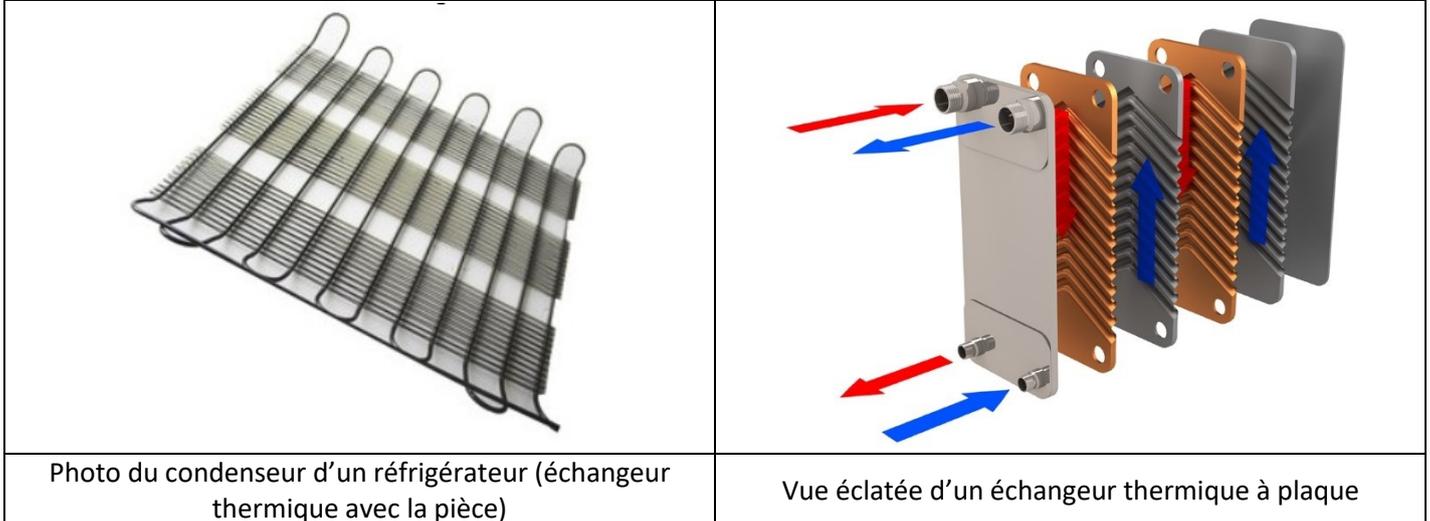
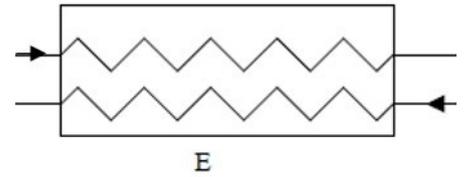
La transformation dans une turbine peut aussi être étagée pour améliorer le rendement.

Turbines et compresseurs sont souvent couplés par un arbre commun pour former des turbocompresseurs.

1.2 Échangeur thermique calorifugé

Un échangeur thermique, comme son nom l'indique, permet la réalisation d'un échange thermique entre un fluide α et un fluide β sans qu'ils se mélangent. Cet échange thermique se fait sans l'apport de travail utile ($w_{i,ech} = 0$).

L'échange thermique peut aussi s'effectuer avec un thermostat (cas du réfrigérateur).



On considère un échangeur thermique calorifugé.

9) Exprimer la puissance thermique $\Phi_{th,\alpha}$ reçue par le fluide α en fonction de son débit massique $D_{m,\alpha}$ et de sa variation d'enthalpie $\Delta h_\alpha = h_{S,\alpha} - h_{E,\alpha}$.

10) Faire de même pour le fluide β .

11) Comparer les puissances thermiques $\Phi_{th,\alpha}$ et $\Phi_{th,\beta}$.

12) Dans le cas où les deux fluides sont des liquides de capacité thermique massique c_α et c_β , relier les températures en entrée $T_{E,\alpha}$, $T_{E,\beta}$ et en sortie $T_{S,\alpha}$, $T_{S,\beta}$ de chacun des deux fluides dans l'échangeur.

Remarque :

Dans le cas d'un changement d'état pour l'un ou les deux fluides, il convient de prendre en compte les enthalpies massiques de changement d'état.

1.3 Détendeur calorifugé (laminage)

Un détendeur est un organe permettant d'induire une chute de pression du fluide sans travail utile ($w_{i,det} = 0$) en forçant son passage à travers un obstacle fixe (bouchon poreux, tube capillaire ou encore soupape ajustable).



	<p style="text-align: center;"><i>milieu poreux fixe (ou vanne réglable mais fixe lors de l'écoulement permanent étudié)</i></p>
<p>Photo d'un détendeur de réfrigérateur</p>	<p>Modélisation simple d'un détendeur</p>

On considère un détendeur calorifugé.

13) Réécrire le premier principe industriel dans le cas du détendeur. Comment appelle-t-on ce type de transformation ?

Remarque :

Le passage dans un détendeur est en général irréversible.

Le passage dans un détendeur peut s'accompagner d'un changement d'état du fluide.

2 Cycles industriels

2.1 Rappels : Machines thermiques

Définition :

Une **machine thermique** permet de réaliser des échanges énergétiques grâce à un fluide en contact avec les différentes parties de la machine.

Systeme :

Le système étudié sera donc toujours le fluide.

Convention :

Vu les conventions thermodynamiques, le travail et les transferts thermiques seront donc toujours compter positivement quand ils sont reçus par le fluide et négativement s'ils sont fournis par le fluide.

Catégories :

Les machines thermiques peuvent être séparées en deux catégories :

- les **moteurs** : ces machines ont pour but de donner un travail mécanique à l'extérieur, le travail reçu par le fluide est donc négatif
- les **récepteurs** : le fluide de ces machines reçoit du travail du milieu extérieur, le travail reçu par le fluide est donc positif. Leur but est de réchauffer (pompe à chaleur) ou refroidir (réfrigérateur) le plus efficacement une source au contact de la machine.

Description :

La plupart des machines thermiques que nous étudierons seront **dithermes**, c'est-à-dire qu'elles fonctionnent avec deux sources, souvent appelées source chaude (de température T_c) et froide (de température T_f). Elles fournissent respectivement les transferts thermiques Q_c et Q_f . L'étude d'une machine thermique commence donc par repérer les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques.

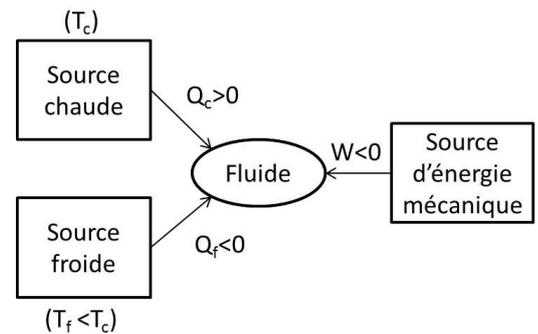


Diagramme :

Ces échanges dans les différentes parties de la machine peuvent être lus ou repérés grâce à un cycle sur un diagramme thermodynamique. Le sens du parcours de ces cycles nous renseignera sur le fonctionnement de la machine : moteur ou récepteur.

Définition :

Quelle que soit l'installation, motrice ou réceptrice, on définit le **coefficient de performance (COP)** comme le rapport de la puissance utile sur la puissance couteuse :

$$COP = \frac{P_{utile}}{P_{couteuse}}$$

Remarque :

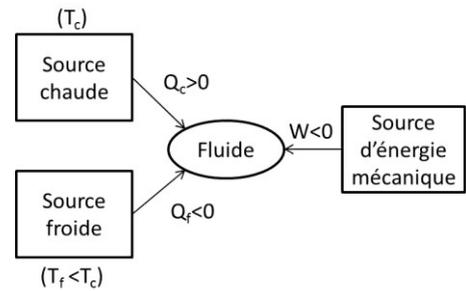
Cela s'appelle aussi le rendement pour les moteurs ou l'efficacité pour les récepteurs.

2.2 Moteurs thermiques

2.2.1 Description des échanges d'énergie

Principe :

Le transfert thermique se fait naturellement de la source chaude vers la source froide au travers du fluide circulant dans les tuyaux de la machine. En réalisant ce transfert naturel, le fluide peut entraîner une pièce mécanique mobile et donc engendrer un travail mécanique.



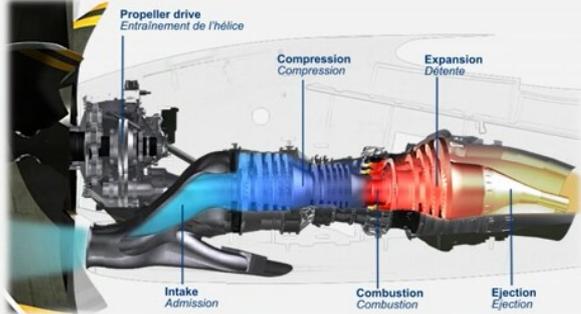
2.2.2 Exemple de cycle moteur : Turbomachine avec changement d'état

2.2.2.1 Définition

Une turbomachine est une machine tournante qui réalise un transfert d'énergie entre son arbre propre, et un fluide en mouvement. Ce transfert peut s'effectuer dans les deux sens :

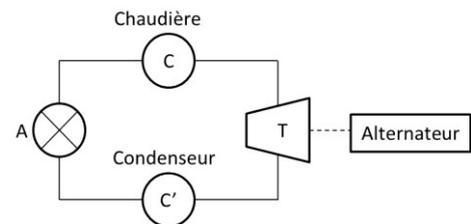
- une récupération de l'énergie du fluide sur l'arbre de la machine
- une augmentation de l'énergie du fluide par fourniture d'énergie mécanique sur l'arbre de la machine

2.2.2.2 Exemples et ordres de grandeur

Production d'énergie électrique	Propulsion par réaction
	
Turbine à cycle combiné STF-650 series (General Electric)	Europrop International TP400-D6 (Moteur de l'A400 M)
Puissance variant de quelques kW à près de 2000 MW	Puissance variant de quelques 100 kW à près de 90 MW

2.2.2.3 Etude

On considère une installation de production d'énergie électrique comportant une chaudière C, une turbine T, un condenseur C', et une pompe A.



Le fluide utilisé est l'eau, il décrit le cycle suivant :

- La pompe alimentaire amène le **liquide saturant**, pris à la sortie du condenseur (état A), jusqu'à la pression P_1 de la chaudière. Cette opération est pratiquement **adiabatique** et on peut considérer qu'à la sortie de la pompe le fluide est liquide (état B) pratiquement à la température T_2 du condenseur. On admet que le travail massique mis en jeu dans la pompe, $w_{i,pompe}$, est négligeable devant celui fourni par la turbine, $w_{i,turbine}$.

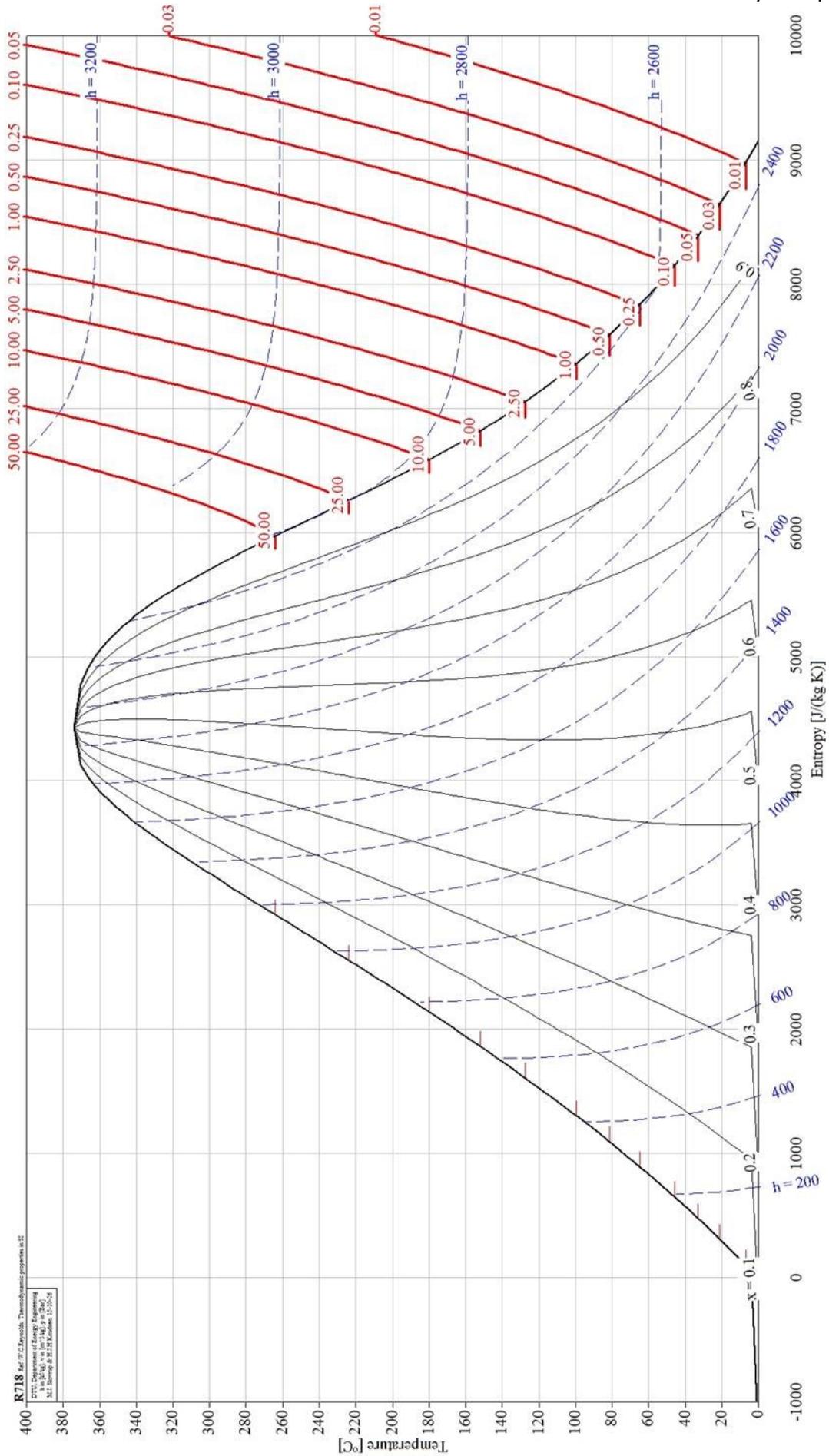
- L'eau est alors injectée dans la chaudière où elle se vaporise de façon **isobare** (P_1). A la sortie de la chaudière, la **vapeur** est **saturante sèche** à T_1 (état C).

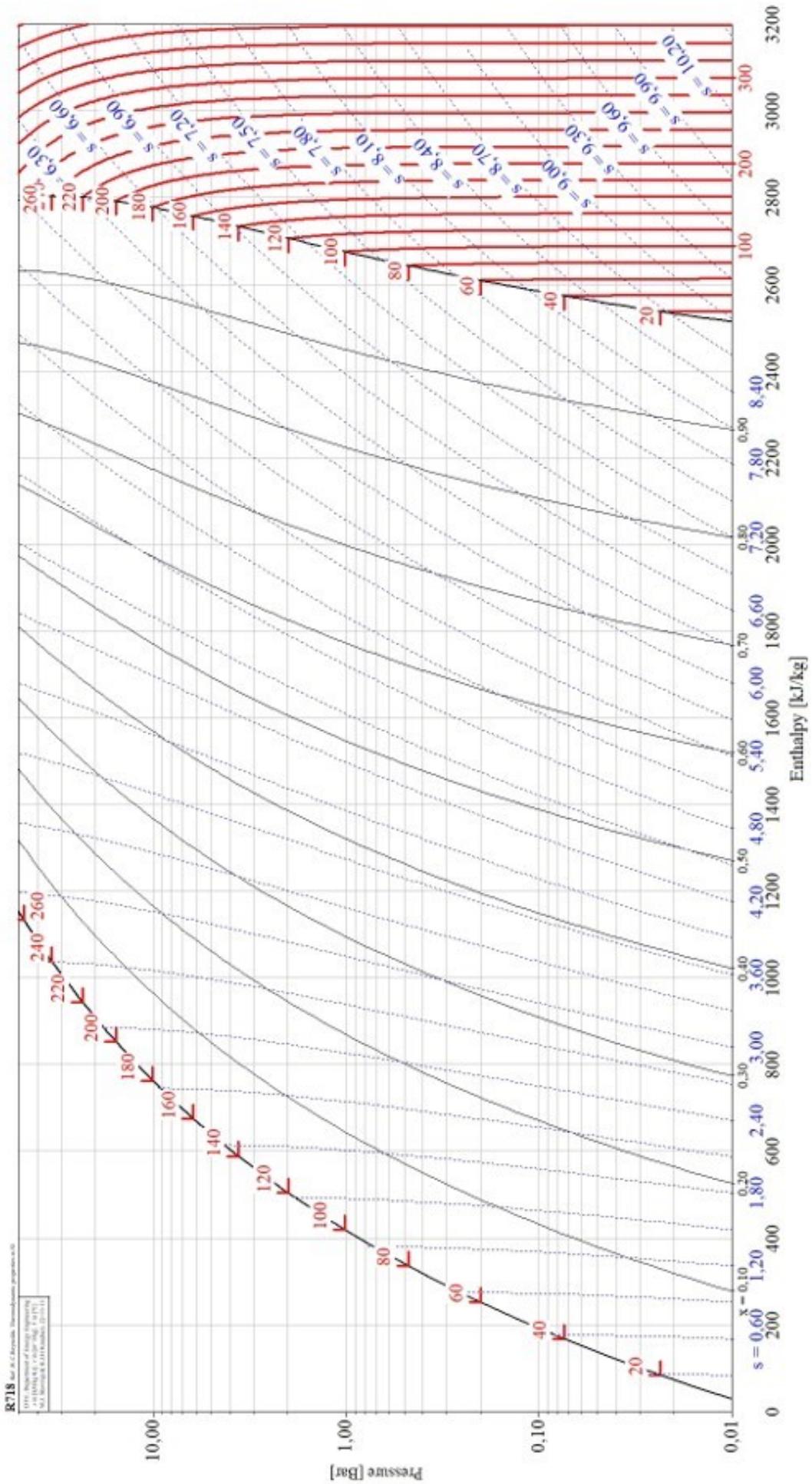
- Elle subit ensuite une détente **adiabatique** et **réversible** dans une turbine T (partie active du cycle). A la sortie de la turbine, le fluide est à la température T_2 et à la pression P_2 du condenseur (point D), où il achève de se liquéfier de façon **isobare** (point A).

- Données :
- Enthalpie de vaporisation à 523 K : $l_1 = 1714 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 - Chaleur massique du liquide : $c_{liq} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - masse volumique du liquide : $\mu = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Température	Pression	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
$T_1 = 523 \text{ K}$	$P_1 = 39,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$		$h_c = 2800 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$T_2 = 293 \text{ K}$	$P_2 = 2300 \text{ Pa}$	$h_l(293) = 84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_v(293) = 2538 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

- 1) Repérer les étapes au cours desquelles ont lieu les échanges thermiques. Représenter le sens des échanges thermiques et mécaniques sur un schéma.
- 2) A quel type de machine thermique a-t-on affaire ? Quel sera alors le sens du cycle sur un diagramme de Clapeyron, un diagramme entropique ou un diagramme des frigoristes ?
- 3) Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron. On fera notamment apparaître les isothermes T_1 et T_2 . On expliquera le tracé des courbes représentatives de chaque étape.
- 4) Tracer le cycle dans le diagramme entropique de l'eau fourni.
- 5) Tracer le cycle dans le diagramme des frigoristes de l'eau fourni.
- 6) Compléter le tableau de donnée avec l'enthalpie massique du liquide saturant, $h_l(523)$, à la température T_1 .
- 7) Exprimer la variation d'enthalpie massique pour chacune des étapes en fonction des données de l'énoncé et du titre massique au point D, x_D , si besoin. Commenter le signe.
- 8) Que peut-on dire de la variation d'entropie massique dans la turbine ? En utilisant un cycle fictif que l'on précisera, retrouver la valeur du titre massique au point, D, x_D . Comparer à la valeur lue sur le diagramme entropique fourni.
- 9) En déduire la valeur de l'enthalpie massique au point D, h_D .
- 10) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou rendement, η , de cette turbomachine en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.
- 11) Retrouver la formule donnant le rendement de Carnot. Comparer au rendement de la turbomachine.
- 12) La puissance typique fournie par ce genre d'installation est d'une centaine de kW. Quel est le débit massique d'eau nécessaire pour atteindre cette puissance ? Exprimer alors le débit volumique en m^3/h .





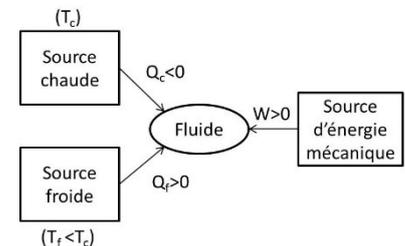
2.3 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

Ces deux machines font partie de ce qu'on appelle des récepteurs thermiques. Les échanges d'énergie en leur sein sont donc les mêmes, mais dans le cas du réfrigérateur, on s'intéressera à la source froide, tandis que dans le cas de la pompe à chaleur, on s'intéressera à la source chaude.

2.3.1 Description des échanges d'énergie

Principe :

Le fluide reçoit du travail de l'extérieur et un transfert thermique de la source froide pour en céder un à la source chaude. Cette situation est l'inverse de celle des transferts thermiques spontanés entre un corps chaud et un corps froid, d'où la nécessité de fournir un travail.



2.3.2 Réfrigérateur

<https://www.youtube.com/watch?v=ZKBiaHroY-o&index=5&list=PL2EB473ED87C5561D>

2.3.2.1 Principe de fonctionnement

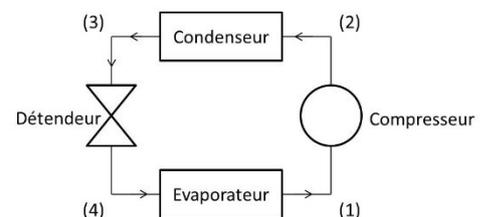
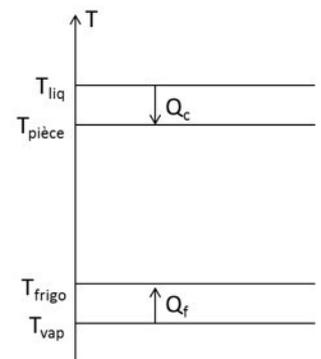
Un réfrigérateur exploite les changements d'état d'un fluide, ce qui permet des transferts thermiques bien plus intenses.

L'évaporateur est au contact de la source froide. Le fluide y est à une température légèrement inférieure au compartiment réfrigéré. Un transfert thermique a donc lieu du compartiment vers le fluide ($Q_f > 0$) ce qui provoque sa vaporisation.

Le condenseur est au contact de l'air ambiant. Le fluide y est à une température légèrement supérieure. Un transfert thermique a donc lieu du fluide vers l'air ambiant ($Q_c < 0$) ce qui provoque sa liquéfaction.

Il faut alors deux composants supplémentaires pour amener le fluide de la température T_{vap} à la température T_{liq} et changer sa pression en conséquence. Ceci est réalisé grâce à un compresseur et un détendeur.

Plaçons-nous en sortie du condenseur. Le fluide est à l'état liquide à la température T_{liq} . Il entre dans le détendeur où il subit une détente qui fait diminuer sa pression et sa température, jusqu'à le transformer partiellement en vapeur à la température T_{vap} . Le fluide pénètre alors dans l'évaporateur et se vaporise à la température T_{vap} . Un compresseur comprime ensuite ce gaz de manière à augmenter sa pression et sa température. Il fournit ainsi un travail au fluide ($W > 0$). Le fluide passe alors dans le condenseur où il se liquéfie à la température T_{liq} .



Remarque :

On s'intéresse maintenant au compartiment frigorifique de capacité thermique C . Comme $Q_f > 0$, et la transformation isobare, on peut écrire : $-Q_f = C\Delta T$. Donc on observe bien une diminution de la température dans le compartiment.

Ordres de grandeur :

Le réfrigérateur ne peut fonctionner que si le compresseur est alimenté. La puissance électrique d'un réfrigérateur se situe autour des 200 W.

2.3.2.2 Exemple de cycle

On peut résumer cette description par le cycle suivant :

- de (1) à (2) : le fluide (R134a) est à l'état de **vapeur saturante sèche** à la température T_4 . Il subit une compression **adiabatique réversible** le menant à la pression P_3 . Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de **vapeur sèche**.

- de (2) à (3) : l'évolution est **isobare**. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et une source chaude. Dans l'état (3), le **liquide est saturant** à la pression P_3 .

- de (3) à (4) : le fluide subit une détente **isenthalpique** (adiabatique). L'état (4) ramène à la même pression que l'état (1). On notera x_4 le taux de vapeur correspondant.

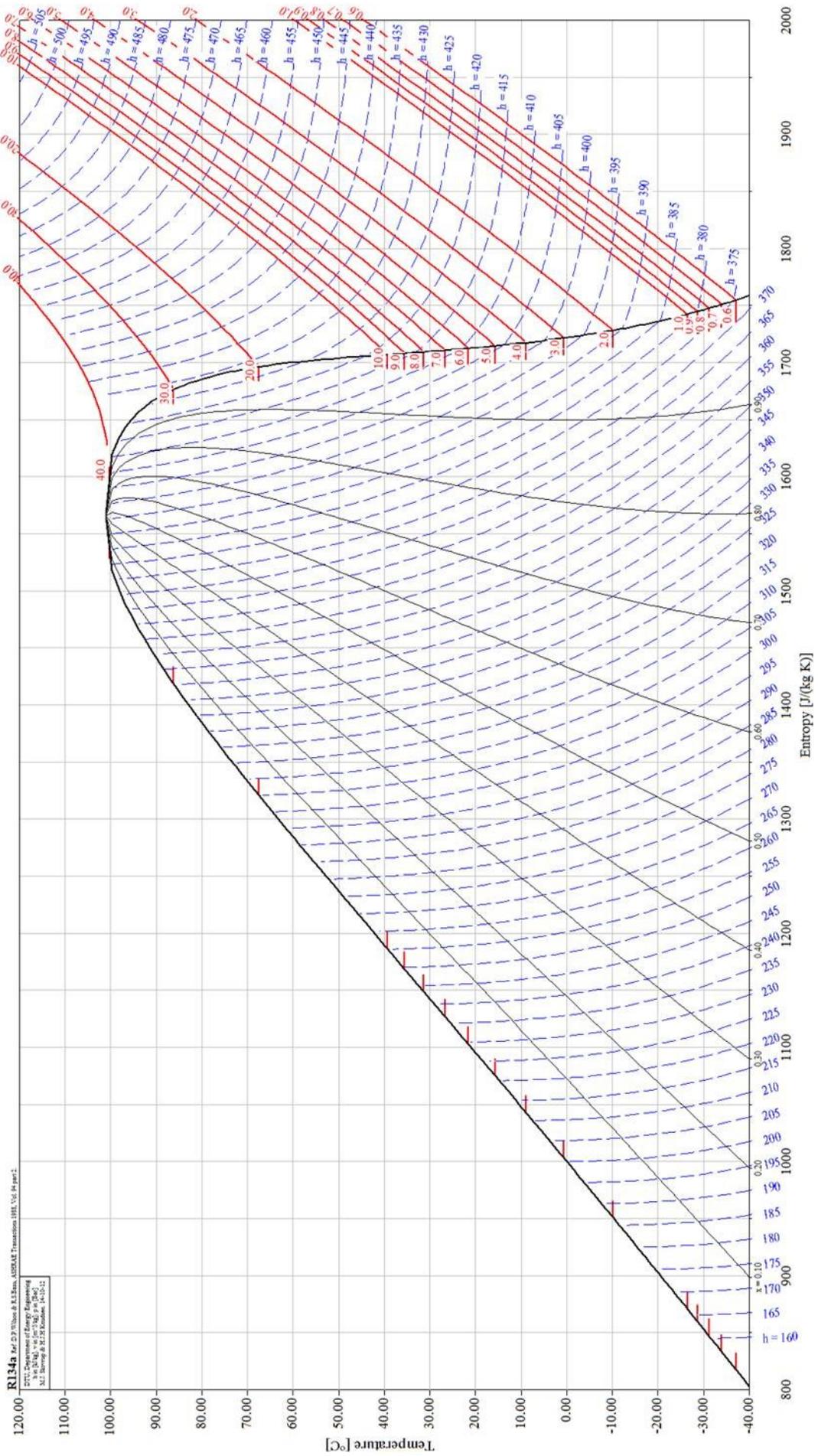
- de (4) à (1) : l'évolution est **isobare**. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et la source froide (enceinte réfrigérée).

Données :

Température	Pression	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
$T_3 = 313\text{ K}$	$P_3 = 10\text{ bar}$	$h_l(T_3) = 256\text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_3) = 418\text{ kJ.kg}^{-1}$
$T_4 = 263\text{ K}$	$P_4 = 2\text{ bar}$	$h_l(T_4) = 187\text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_4) = 391\text{ kJ.kg}^{-1}$

à l'état (2) : $h_2 = 425\text{ kJ.kg}^{-1}$

- 13) Identifier les températures T_3 et T_4 aux températures T_{vap} ou T_{liq} .
- 14) A quel type de machine thermique a-t-on affaire ? Quel sera alors le sens du cycle sur un diagramme de Clapeyron, un diagramme entropique ou encore des frigoristes ?
- 15) Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron. On fera notamment apparaître les isothermes T_3 et T_4 . On expliquera le tracé des courbes représentatives de chaque étape.
- 16) Tracer le cycle dans le diagramme entropique du fluide R134a fourni.
- 17) Tracer le cycle dans le diagramme des frigoristes du R134 fourni.
- 18) Exprimer la variation d'enthalpie massique pour chacune des étapes en fonction des données de l'énoncé et du titre massique au point 4, x_4 , si besoin. Commenter le signe.
- 19) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou efficacité, ε_f , de ce réfrigérateur en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.
- 20) En prenant la consommation électrique moyenne d'un réfrigérateur de l'ordre de $P_E = 200\text{ W}$, sachant que le compresseur à un rendement unitaire, donner la valeur de la puissance frigorifique P_F échangée avec l'intérieur du réfrigérateur.
- 21) Retrouver la formule donnant l'efficacité de Carnot. Comparer à l'efficacité du réfrigérateur. Pour un cycle réversible, comment régler les températures T_f et T_c pour obtenir une efficacité maximale ? Commenter.
- 22) Calculer l'entropie créée au cours du cycle. Que peut-on dire de la réversibilité du cycle ?



2.3.3 Pompe à chaleur

2.3.3.1 Principe de fonctionnement

Une pompe à chaleur fonctionne exactement sur le même principe qu'un réfrigérateur. Sauf que l'on s'intéresse ici à la source chaude, l'intérieur d'une habitation et que le but est de la réchauffer donc de lui fournir un transfert thermique. La source froide peut être l'extérieur (pompe à chaleur air/air) ou le sol (pompe à chaleur géothermique).

Ordres de grandeur :

La puissance électrique d'une pompe à chaleur dépend principalement de son modèle ainsi que de son alimentation. De manière générale, on estime que la puissance électrique d'une pompe à chaleur classique pour habitation se situe entre 15 et 20 kW.

2.3.3.2 Exemple de cycle

On reprend le cycle du réfrigérateur donné précédemment, mais on souhaite utiliser sa fonctionnalité de pompe à chaleur.

23) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou efficacité, ε_c , de cette pompe à chaleur en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.

Cette efficacité exprime le fait qu'utiliser une pompe à chaleur permet de donner ε_c fois plus d'énergie à la source que l'on cherche à réchauffer qu'un radiateur électrique (récepteur monotherme) pour une consommation électrique donnée.

24) Retrouver la formule donnant l'efficacité de Carnot. Comparer à l'efficacité de la pompe à chaleur.

25) Ce mode de chauffage est très séduisant si l'on dispose d'une source de chaleur gratuite à un niveau de température suffisant. Si la température extérieure décroît, comment varie le COP ? Commenter.

26) Comparer le COP d'une pompe à chaleur à celui d'un réfrigérateur avec le même écart de température.

27) On a maintenant une pompe à chaleur fonctionnant entre l'air extérieur de température fixe $T_a = 283K$ et la pièce à chauffer de température T . Initialement, la pièce est à la température T_a et on désire la chauffer jusqu'à la température $T_{fin} = 293K$. La pièce possède une capacité thermique $C = 6.10^6 J.K^{-1}$ et est supposée bien calorifugée. Quel est le transfert thermique que l'on doit fournir à la pièce ?

28) Le COP typique est environ de 4. Quel est alors le travail fourni au fluide ? La pompe à chaleur consomme environ 1kW. Quel est le temps nécessaire au chauffage de la pièce ?

29) Combien de temps faudrait-il pour chauffer la pièce si l'on utilisait un radiateur électrique de même puissance ?

3 Questions de cours

- 1) Ecrire le premier principe industriel dans le cas d'un compresseur calorifugé. Commenter le signe de la variation d'enthalpie.
- 2) Ecrire le premier principe industriel dans le cas d'une turbine calorifugé. Commenter le signe de la variation d'enthalpie.
- 3) Comment peut-on relier les puissances thermiques entre un fluide 1 et un fluide 2 dans un échangeur thermique calorifugé ?
- 4) Ecrire le premier principe industriel dans le cas du détenteur calorifugé. Comment appelle-t-on ce type de transformation ?
- 5) Qu'est-ce que le coefficient de performance d'une machine thermique ?
- 6) Dans le cas d'un moteur, donner le sens des échanges énergétiques. On représentera cela sur un schéma.
- 7) Dans le cas d'un récepteur, donner le sens des échanges énergétiques. On représentera cela sur un schéma.
- 8) Définir le rendement d'un moteur, l'efficacité d'un réfrigérateur et d'une pompe à chaleur.
- 9) Dans quel sens seront parcourus les cycles d'un moteur et d'un récepteur sur les diagrammes de Clapeyron, entropique et des frigoristes ?
- 10) Qu'appelle-t-on rendement de Carnot ? Redémontrer son expression en fonction des températures des sources chaudes et froides.
- 11) Citer des ordres de grandeur de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs.

4 DM pour le 21/11/2022

4.1 Centrale TSI 2021

Le principe de la cogénération au gaz naturel est de produire à la fois de l'électricité et de l'eau chaude. On utilise pour cela une centrale à vapeur et on récupère de l'énergie mécanique dans sa turbine et de l'énergie thermique au niveau du condenseur. On s'intéresse dans un premier temps au fonctionnement général d'une telle centrale sans prendre en compte la valorisation de l'énergie dissipée dans le condenseur. Puis dans une dernière partie on étudie la récupération d'énergie thermique.

Le cycle de base d'une centrale à vapeur parcouru par de l'eau est schématisé en Figure 9. Il consiste essentiellement en une chaudière où le combustible est brûlé générant ainsi de la vapeur d'eau surchauffée (2 → 3) qui est ensuite détendue dans une turbine à vapeur dont l'arbre fournit le travail moteur (3 → 4). La vapeur d'eau sortant de la turbine est totalement liquéfiée dans un condenseur (4 → 1) avant qu'une pompe ne lui redonne la pression de chaudière (1 → 2). Le refroidissement du condenseur est assuré par une source froide externe.

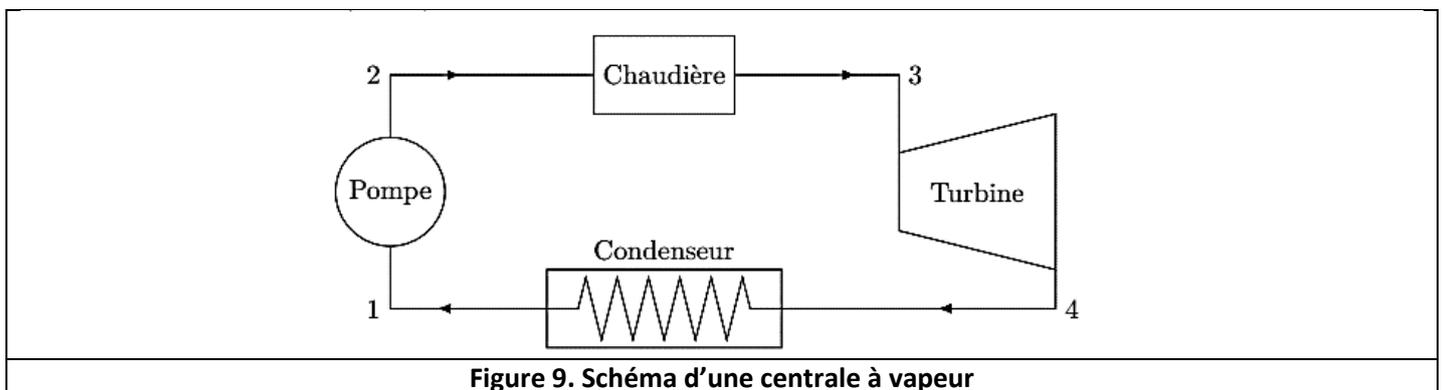


Figure 9. Schéma d'une centrale à vapeur

On supposera les transformations subies par le système dans la turbine et dans la pompe comme étant adiabatique et réversible. On négligera le travail de la pompe devant le travail de la turbine : $|W_p| \ll |W_t|$.

Le fluide est en écoulement stationnaire avec un débit massique $D_{m1} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. On négligera les variations de vitesse et d'altitude du fluide.

On donne l'expression de l'entropie S en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ d'une masse donnée d'eau liquide à la température T :

$$S(T) = S(T_0) + C_{eau} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

Avec C_{eau} la capacité thermique de l'eau en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$. On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide :

$$c_{eau} = 4,18 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

4.1.1 Description du cycle thermodynamique

On considère que le fluide circulant au cours d'un cycle reçoit les transferts thermiques Q_c et Q_f respectivement des sources chaudes de température T_c et froide de température T_f ainsi que le travail mécanique de la turbine W_t .

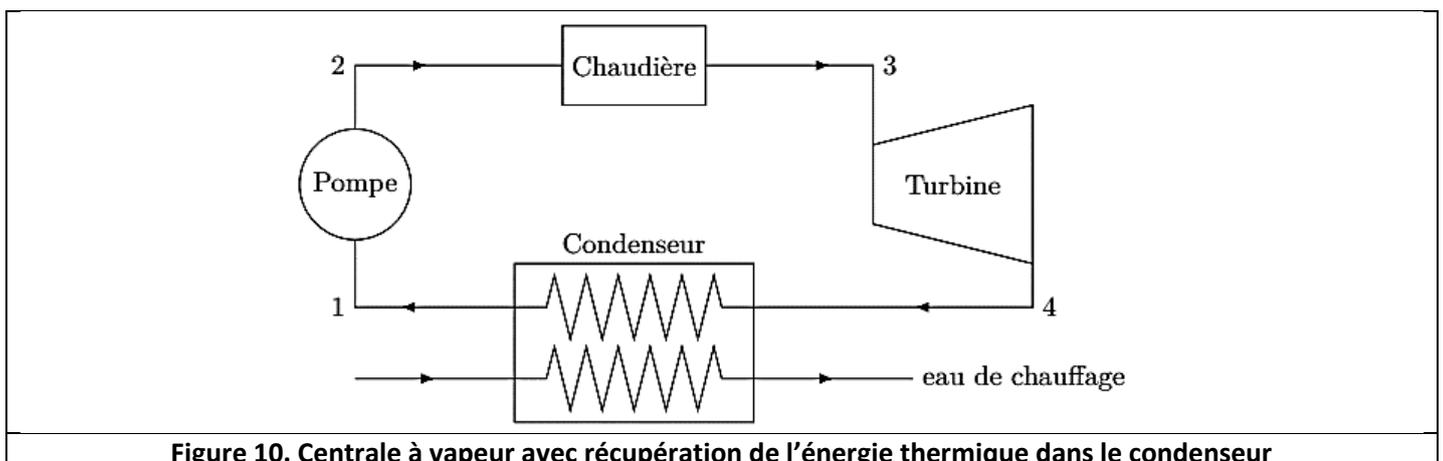
- 1) Préciser, en justifiant, les signes de Q_c , Q_f et W_t .
- 2) Pourquoi ce cycle est qualifié de cycle à combustion externe ? Quel avantage présente-t-il ? Donner un exemple de cycle à combustion interne.
- 3) Exprimer le rendement η de la machine en fonction de Q_c et W_t .
- 4) En déduire l'expression du rendement η en fonction de T_f , T_c , Q_c et S_c l'entropie créée au cours d'un cycle.
- 5) En déduire l'expression du rendement de Carnot η_c . Effectuer l'application numérique avec $T_f = 300 \text{ K}$ et $T_c = 603 \text{ K}$.

4.1.2 Diagramme entropique

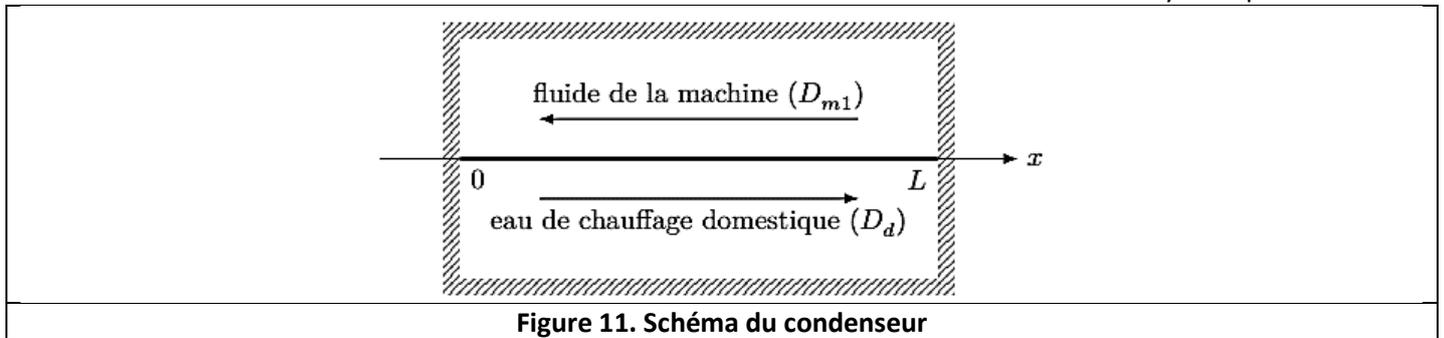
- Au point 1 en sortie de condenseur, l'eau est à l'état liquide saturant, sous une faible pression à la température T_f .
 - La pompe (1 → 2) comprime l'eau à environ 128 bar. La température T reste sensiblement constante pendant cette compression. Le point 2 se situe à l'intersection de l'isotherme $T = 300\text{ K}$ et de l'isobare $P = 128\text{ bar}$.
 - Dans la chaudière (2 → 3), l'eau sous pression est portée à haute température, l'échauffement comportant les deux étapes :
 - Chauffage du liquide à pression constante ;
 - Evaporation de l'eau jusqu'à la dernière goutte de liquide.
 - L'évolution dans la turbine (3 → 4) est modélisée par une détente adiabatique réversible.
- 6) Compléter le diagramme entropique (Annexe 1), en représentant le cycle parcouru par le fluide et en indiquant les étapes 1, 2, 3 et 4.
 - 7) Compléter le diagramme des frigoristes (Annexe 2), en représentant le cycle parcouru par le fluide et en indiquant les étapes 1, 2, 3 et 4.
 - 8) Calculer le transfert thermique massique q_c reçu par le fluide dans la chaudière.
 - 9) Calculer le travail massique w_t reçu de la part de la turbine.
 - 10) Justifier la légitimité de l'hypothèse $|w_p| \ll |w_t|$.
 - 11) Préciser la nature de la transformation 4 → 1. Quel est l'intérêt de cette étape ?
 - 12) Etablir l'expression de la fraction massique de vapeur x_{v4} au point 4 en fonction de h_1 , h_4 et $\Delta h_v(T_f)$, enthalpie massique de vaporisation à la température T_f . Faire l'application numérique.
 - 13) Exprimer les variations d'entropie au cours de chaque transformation du système $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$, $\Delta S_{2 \rightarrow 3}$, $\Delta S_{3 \rightarrow 4}$ et $\Delta S_{4 \rightarrow 1}$ en fonction de la masse du système m , la capacité massique de l'eau c_{eau} , T_f , T_c , $\Delta h_v(T_f)$, $\Delta h_v(T_c)$ et x_{v4} .
 - 14) En déduire l'expression de x_{v4} en fonction de $\Delta h_v(T_f)$, $\Delta h_v(T_c)$, c_{eau} , T_f et T_c .
 - 15) Quelle puissance mécanique P_t reçoit la turbine ? Faire l'application numérique. Commenter le résultat.

4.1.3 Récupération de l'énergie thermique

On s'intéresse ici à l'énergie thermique que l'on peut récupérer au niveau du condenseur afin de produire de l'eau chaude pour alimenter une installation de chauffage domestique (Figure 10).



Le condenseur est un échangeur thermique que l'on suppose parfaitement calorifugé, schématisé en Figure 11.



- 16)** Calculer la puissance thermique reçue par l'eau de chauffage domestique P_d .
- 17)** Calculer le débit massique D_d que doit posséder l'eau de chauffage domestique.
- 18)** Exprimer puis calculer e_{cogen} , l'efficacité de la machine utilisant le principe de cogénération. Commenter.

