

Ce cours est l'occasion de faire la synthèse des trois cours de thermodynamique précédents : thermodynamique différentielle, transformation des corps purs, et diffusion thermique, ainsi que du cours de mécanique des fluides. On étudiera des systèmes thermodynamiques industriels, comme des climatisations, des systèmes frigorifiques, ou des centrales thermiques de production électrique.

Tous ces systèmes ont en commun l'utilisation d'un fluide circulant en circuit fermé entre différentes sources de chaleur, et différents composants dont le rôle est d'échanger de la chaleur ou du travail avec ce dernier. Pour étudier ces différents composants, qui ensemble forment la machine thermodynamique, on devra appliquer le premier et le second principe de la thermodynamique en système ouvert (puisque le fluide entre et sort en continu de chaque composant).

## TABLE DES MATIÈRES

I - MACHINES THERMIQUES : RAPPELS ET GÉNÉRALITÉS -----	1 -----
I.1 - Principe général d'une machine thermique -----	1 -----
I.2 - Cycle de Carnot (rappel) -----	2 -----
II - PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE EN SYSTÈME OUVERT -----	3 -----
II.1 - Méthode de traitement des systèmes ouverts -----	4 -----
II.2 - Démonstration du premier principe en système ouvert -----	4 -----
II.3 - Deuxième principe en système ouvert -----	5 -----
II.4 - Systèmes à entrées ou sorties multiples -----	5 -----
III - COMPOSANTS INDUSTRIELS USUELS -----	5 -----
III.1 - Composants avec transfert de travail fluide/extérieur -----	6 -----
III.2 - Composants avec transfert thermique fluide/extérieur -----	8 -----
III.3 - Composants sans transferts de travail ou de chaleur -----	8 -----
III.4 - Bilan des composants usuels -----	10 -----
IV - EXEMPLES DE CYCLES INDUSTRIELS CLASSIQUES -----	10 -----
IV.1 - Pompe à chaleur -----	11 -----
IV.2 - Cycle de Rankine -----	12 -----

## I - MACHINES THERMIQUES : RAPPELS ET GÉNÉRALITÉS

### Machine thermique

Une machine thermique est dispositif dans lequel un fluide subit des **transformations cycliques**, au cours desquelles il échange de l'énergie par **travail et transfert thermique** avec l'extérieur.

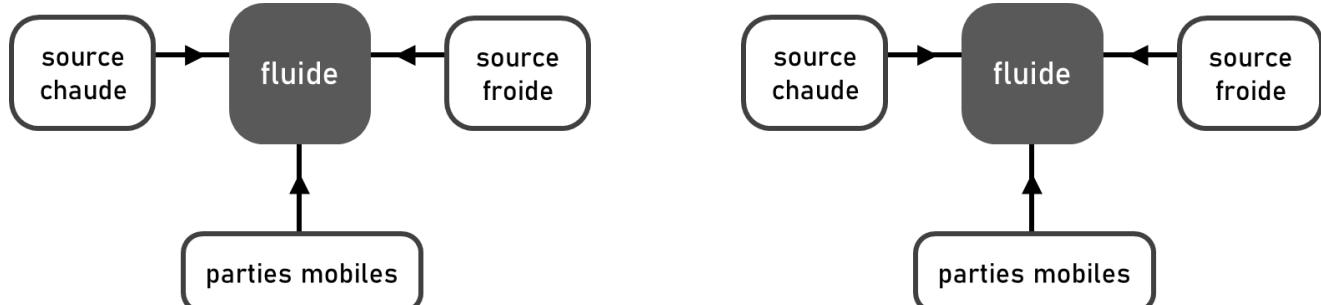
De très nombreux appareils peuvent être considérés comme des machines thermiques : un moteur thermique de voiture, un réacteur d'avion, une pompe à chaleur, une climatisation, une centrale thermique de production d'électricité, etc.

### I.1 - Principe général d'une machine thermique

Une machine est « ditherme » si elle réalise des transferts thermiques avec deux sources uniquement. On distingue deux grands types de machines thermiques, selon qu'on souhaite :

- Récupérer un travail mécanique à partir d'une source de chaleur \_\_\_\_\_
- Effectuer un transfert thermique du froid vers le chaud \_\_\_\_\_

#### I.1.A - Grands types de machines dithermes



**Cas du moteur :** On prend de la chaleur à une source chaude, une partie est utilisée pour produire un travail récupérable, et l'autre partie est transmise à une source froide.

**Cas d'une machine frigorifique :** On exerce un travail sur le fluide, dans le but de le forcer à prélever de l'énergie à une source froide, pour la transmettre à une source chaude.

Dans la plupart des moteurs étudiés en première année, la source chaude n'est pas un simple corps chaud qui transmet de la chaleur au fluide, mais une combustion réalisée au sein du fluide, et produisant de la chaleur. De même, la source froide n'est pas un simple corps froid, mais simplement l'évacuation du fluide vers l'extérieur, remplacé par un nouveau fluide (comme s'il avait été refroidi)<sup>1</sup>.

Dans ce chapitre, nous étudierons des machines thermiques où un fluide circule réellement en cycle fermé, entre une source froide, une source chaude, et d'autres composants que nous définirons plus bas.

### I.1.B – Rendement et efficacité

Dans tous les cas, le rendement ou l'efficacité (aussi appelée « coefficient de performance ») s'exprime par le rapport de l'énergie souhaitable récupérée, sur l'énergie dépensée (quelles que soient les natures de ces deux énergies, travail ou chaleur) :

$$\text{rendement ou efficacité} = \frac{\text{énergie souhaitable récupérée}}{\text{énergie dépensée}}$$

L'expression peut être retrouvée dans chaque cas, en se rappelant de l'objectif de chaque machine thermique :

Rendement d'un moteur	Efficacité d'une machine frigorifique	Efficacité d'une pompe à chaleur
On doit chauffer un fluide afin de récupérer un travail mécanique :	On doit compresser un fluide pour prélever de la chaleur à une source froide, et la relâcher dans la source chaude :	On doit compresser un fluide pour prélever de la chaleur à une source froide, et la relâcher dans la source chaude :

Le rendement est toujours inférieur à 1, mais l'efficacité est très souvent supérieure. Par contre, tous sont positifs.

Les rendements et efficacités, qu'on souhaite toujours aussi grands que possible, sont bornés par le rendement et l'efficacité d'un cycle idéal abordé en première année : le cycle de Carnot.

## I.2 – Cycle de Carnot (rappel)

### I.2.A – Nature des transformations

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique ditherme pour lequel l'efficacité (ou le rendement) est la meilleure. Ce cycle est constitué de quatre transformations :

- Une compression isotherme réversible (le système perd de la chaleur) ;
- Une compression adiabatique réversible (le système reçoit du travail) ;
- Une détente isotherme réversible (le système reçoit de la chaleur) ;
- Une détente réversible (le système fournit un travail).

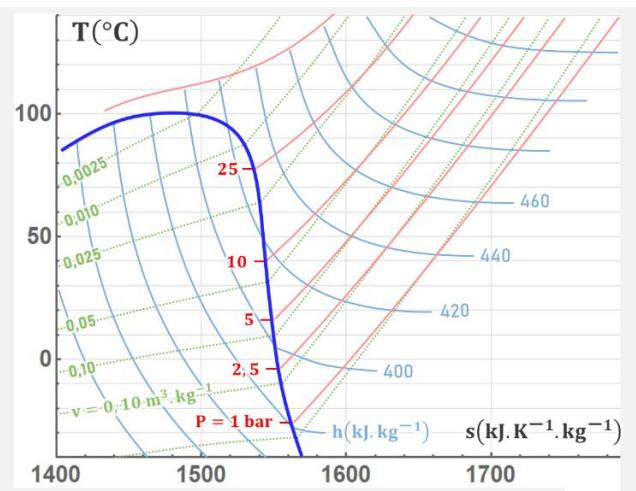
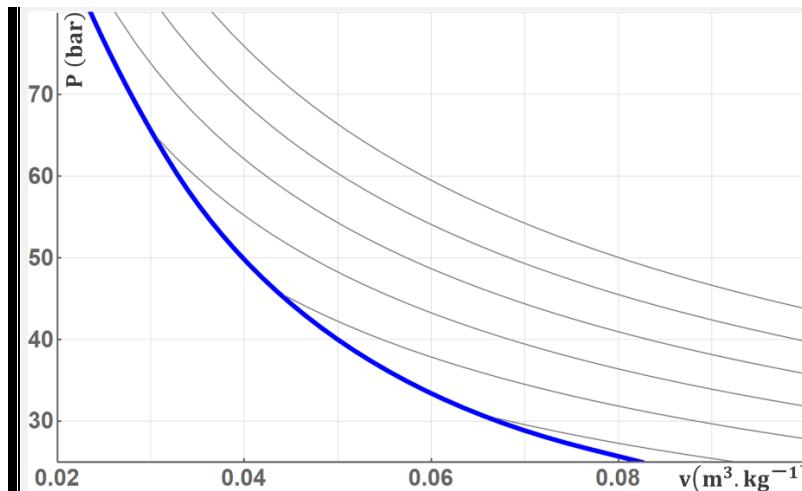
Selon la grandeur relative de chaque transfert, ce cycle peut modéliser un moteur ou une machine frigorifique (climatisation ou pompe à chaleur). Il faut garder à l'esprit que ce moteur n'est qu'une **limite théorique inatteignable**, puisque la réversibilité implique l'absence de frottements ou d'inhomogénéités, la quasi-staticité des transformations (donc une lenteur infinie), etc.

### Application – Cycle de Carnot dans différents diagrammes

Représenter le cycle de Carnot dans un diagramme (P, V), dans la zone vapeur sèche (en supposant le gaz parfait).

Représenter le même cycle dans un diagramme (T, s), dans la zone de vapeur sèche, puis à cheval sur la zone diphasée.

<sup>1</sup> Une exception notable est le moteur de Stirling, dans lequel un gaz subit réellement des chauffages et refroidissements cycliques par une source chaude et froide, tout en restant enfermé dans une enceinte. C'est un moteur rarement rencontré, malgré quelques usages industriels de niche.



### I.2.B - Rendement et efficacité de Carnot (rappel)

Dans cette partie, nous allons retrouver l'expression du rendement d'un cycle ditherme, tout en démontrant que celui-ci est atteint dans le cas des transformations réversibles, c'est-à-dire dans le cas du cycle de Carnot.

#### Démonstration manuscrite – Rendement d'un cycle de Carnot

Retrouver l'expression du rendement de Carnot pour un moteur, et démontrer qu'il est atteint lorsque les transformations subis par le fluide sont réversibles. Les températures des sources sont notées  $T_c$  et  $T_f$ .

On s'aperçoit que le rendement maximal est bien celui exprimé en première année,  $\eta = 1 - T_f/T_c$ . D'autre part, plus l'entropie créée est grande, plus le rendement diminue. La création d'entropie est le signe d'une mauvaise utilisation de l'énergie : dans le cas d'un moteur, l'énergie donnée au système (sous forme de chaleur  $Q_c$ ) est moins convertie en travail, et davantage transmise à la source froide, ce qui constitue une perte indésirable.

Les expressions de  $\Delta U_{\text{cycle}}$  et  $\Delta S_{\text{cycle}}$  utilisées dans la démonstration ci-dessus sont valables pour toutes les machines dithermes. Selon l'expression du rendement ou de l'efficacité, on peut retrouver dans chaque cas le rendement de Carnot (chaque démonstration est au programme) :

Rendement d'un moteur	Efficacité d'une machine frigorifique	Efficacité d'une pompe à chaleur
$\eta = -\frac{W}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$	$e = \frac{Q_f}{W} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$	$e = -\frac{Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$

## II – PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE EN SYSTÈME OUVERT

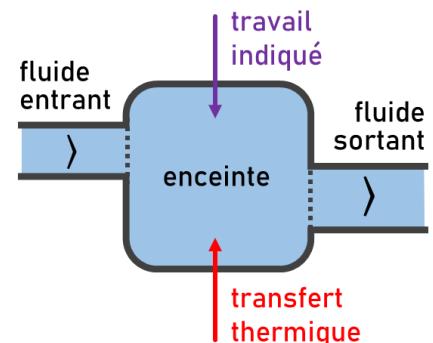
Les principes de la thermodynamique abordés jusqu'à maintenant étaient valables pour des systèmes fermés : ils ne comptent pas les éventuelles entrées ou sorties de matière dans le système. Cela exclut en réalité la plupart des applications industrielles réelles, qu'elles soient physiques ou chimiques :

- En chimie industrielle, il est commun de retirer les produits à mesure que la réaction se fait, puisque l'effet sur le quotient réactionnel pousse toujours la réaction en sens direct ;
- Dans les machines thermiques où circule un fluide, l'étude précise de chaque composant requiert naturellement la prise en compte de fluide entrant et sortant.

## II.1 – Méthode de traitement des systèmes ouverts

Pour formuler les principes de la thermodynamique en système ouvert, on se place dans le cas général suivant : dans une enceinte immobile circule un fluide, entrant par une ou plusieurs entrées, et sortant par une ou plusieurs sorties. Le fluide contenu dans l'enceinte est susceptible de recevoir de la chaleur et/ou du travail. Les entrées et sorties ne sont pas forcément situées à la même hauteur (ce paramètre peut être important : il arrive que des systèmes industriels réels fassent plusieurs dizaines de mètres de haut)

Le schéma de principe est représenté ci-contre, avec une seule entrée et une seule sortie.



Dans la suite, on considérera des bilans (d'énergie, d'enthalpie, d'entropie, etc.) entre un temps  $t$  et  $t + dt$ , réalisés à l'intérieur de l'enceinte. On considérera que toutes les variations d'énergie (qu'elles soient mécaniques, cinétiques, thermiques, etc.) se produisent uniquement à l'intérieur de l'enceinte  $\Sigma_0$ .

On introduit tout d'abord la notion de « travail indiqué » et de « travail de transvasement », qui seront utiles lors des bilans d'énergie dans l'enceinte  $\Sigma_0$  :

### Travaux appliqués à un écoulement dans l'enceinte d'un composant industriel

**Travail indiqué** : travail algébriquement fourni au fluide par les pièces mobiles d'une machine dans  $\Sigma_0$ . Il est positif si le fluide reçoit du travail, et négatif dans le cas contraire.

**Travail de transvasement** : somme des travaux liés à la pression à l'entrée du système  $\Sigma_0$  (pression d'admission) et à la pression en sortie (pression de refoulement). Ce travail fait avancer le fluide dans le système.

Par exemple, dans une pompe, des parties mobiles transmettent un travail au fluide afin de l'amener à circuler vers une sortie où il n'irait pas naturellement ; le travail indiqué est positif. Inversement, dans une turbine, le fluide circulant dans une enceinte met en rotation des parties mobiles (le but étant d'utiliser ce mouvement pour la production d'électricité) ; le travail indiqué est négatif.

## II.2 – Démonstration du premier principe en système ouvert

### Démonstration manuscrite du premier principe en système ouvert, ou premier principe industriel (PPTSO ou PPI)

Dans l'expression manuscrite (\*), si on divise par  $dt$ , on obtient le premier principe industriel en puissance :

#### Premier principe industriel par unité de temps (ou en puissance)

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, avec un débit massique  $D_m$ , on a :

Dans l'expression (\*), en divisant par  $D_m$  (en se rappelant que  $D_m = dm/dt$ ), on obtient le premier principe industriel massique :

#### Premier principe industriel par unité de masse traversant

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, on a :

**Attention** : il faut bien comprendre la signification de ces deux formules, et la différence entre les deux :

- La première est exprimée en  $W = J \cdot s^{-1}$ , c'est-à-dire qu'on compte les transferts d'énergie avec le fluide en **joules par seconde** ;
- La seconde est exprimée en  $J \cdot kg^{-1}$ , c'est-à-dire qu'on compte les transferts d'énergie avec le fluide en **joules par kilogramme de fluide ayant traversé le système  $\Sigma_0$**  : la masse totale de fluide dans tout le circuit n'est absolument pas un paramètre pertinent dans cette expression.

On peut parfois voir le premier principe écrit sous forme compacte, mais déconseillée (je ne l'accepterai pas comme correcte) :

$$\Delta \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = q + w_i \text{ ou plus généralement } \Delta(h + e_c + e_p) = q + w_i$$

**Attention :**  $\Delta$  ne représente non pas une variation entre un état initial et final (comme on l'écrit pour un système fermé), mais une variation entre l'entrée et la sortie du composant considéré (il est parfois écrit  $\Delta_{es}$  pour signifier une différence entrée-sortie), par unité de masse traversant le système.

### II.3 – Deuxième principe en système ouvert

Le décompte de la variation d'entropie dans un système ouvert est plus simple que celle des variations d'énergie, puisque les causes de variation sont moins nombreuses : soit de l'échange thermique, soit de la création au sein du système.

#### Deuxième principe industriel par unité de masse traversant

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, on a :

Où  $s_{ech}$  est l'entropie massique reçue par le fluide par unité de masse traversant (en  $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ ) et  $s_{cr}$  l'entropie créée par unité de masse de fluide traversant le composant.

Encore une fois, on peut aussi exprimer le bilan par unité de temps :

#### Deuxième principe industriel par unité de temps (ou « en puissance »)

Pour un fluide entrant et sortant d'un composant industriel, on a :

Où  $\sigma$  est appelé « taux de création d'entropie » (en  $J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$ ), ou parfois « puissance entropique ».

Les causes de création d'entropie dans un système ouvert sont semblables à celles en système fermé : inhomogénéités des grandeurs thermodynamiques dans le fluide, transformations brutales, vibrations, frottements, échauffement par viscosité, etc.

### II.4 – Systèmes à entrées ou sorties multiples

On généralise sans problème à des systèmes avec plusieurs entrées et sorties. Il existe une nouvelle relation simple de conservation du débit, menant par une démonstration très similaire au premier et deuxième principe :

$$\sum_{\substack{\text{entrées} \\ i}} D_{m,i} = \sum_{\substack{\text{sorties} \\ j}} D_{m,j} \Rightarrow \begin{cases} \sum_{\substack{\text{sorties} \\ i}} D_{m,i} \left( h_s + \frac{1}{2} v_s^2 + g z_s \right) - \sum_{\substack{\text{entrées} \\ j}} D_{m,j} \left( h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + g z_e \right) = P_{th} + P_i \\ \sum_{\substack{\text{sorties} \\ i}} D_{m,i} s_i - \sum_{\substack{\text{entrées} \\ j}} D_{m,j} s_j = \frac{\delta s_{ech}}{dt} + \frac{\delta s_{cr}}{dt} = \frac{P_{th}}{T_{ext}} + \sigma \end{cases}$$

## III – COMPOSANTS INDUSTRIELS USUELS

Dans cette partie, on étudie en détails quelques composants industriels classiques, dont le rôle est d'influer sur certains paramètres de la circulation d'un fluide, liquide ou vapeur. Pour des raisons de simplicité, la plupart des dispositifs industriels ont un effet limité sur l'écoulement et le fluide : ils sont conçus soit pour permettre un échange de travail, soit un échange de chaleur (soit aucun des deux), mais jamais les deux.

## III.1 - Composants avec transfert de travail fluide/extérieur

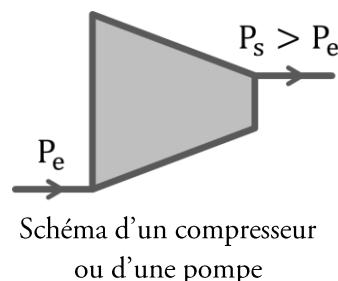
### III.1.A - Compresseur et pompe

#### Compresseur et pompe

Un **compresseur** est un composant à une entrée et une sortie permettant d'augmenter la pression en sortie par rapport à la pression d'entrée.

Une **pompe** a un rôle identique, mais pour les liquides uniquement.

Le passage dans un compresseur s'accompagne d'un **changement de température et/ou d'un changement d'état** d'une partie du fluide.



Compresseur à vis, 1x1x1 m, 11 kW,  
 $P_s \approx 10$  bar,  $1.7 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Si le fluide compressé change de température dans le compresseur ou la pompe, il existe bien sûr un transfert thermique au travers du composant (il n'est pas rare que le dispositif chauffe lors de son utilisation). Cela dit, puisque le fluide circule rapidement dans le composant, une très faible quantité de chaleur est perdue : on considérera toujours la transformation adiabatique.

#### Premier principe appliqué au compresseur (gaz) ou à la pompe (liquide)

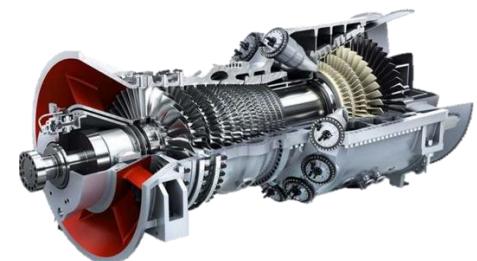
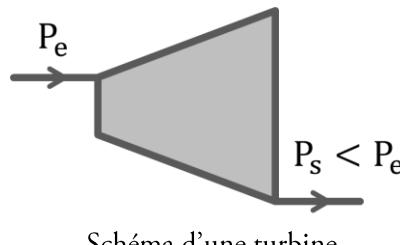
Pour un compresseur parfaitement calorifugé, dans lequel les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables :

### III.1.B - Turbine

#### Turbine

Une turbine est un composant à une entrée et une sortie permettant d'extraire un travail du fluide (par la mise en rotation d'une pièce mobile).

Cela s'accompagne d'une chute de pression, et éventuellement d'une chute de température ou d'un changement d'état.



Turbine à vapeur de centrale,  
13x5x5 m, 545 MW

La turbine est un composant essentiel de toutes les formes industrielles de production électrique. C'est grâce à ce composant qu'un fluide sous pression peut mener à un mouvement de rotation, puis à la production d'électricité via un alternateur. Les turbines à gaz sont utilisées dans les centrales nucléaires, à charbon, à gaz, etc.

#### Premier principe appliqué à la turbine

Pour une turbine parfaitement calorifugée, dans laquelle les variations d'énergie cinétique et potentielles sont négligeables :

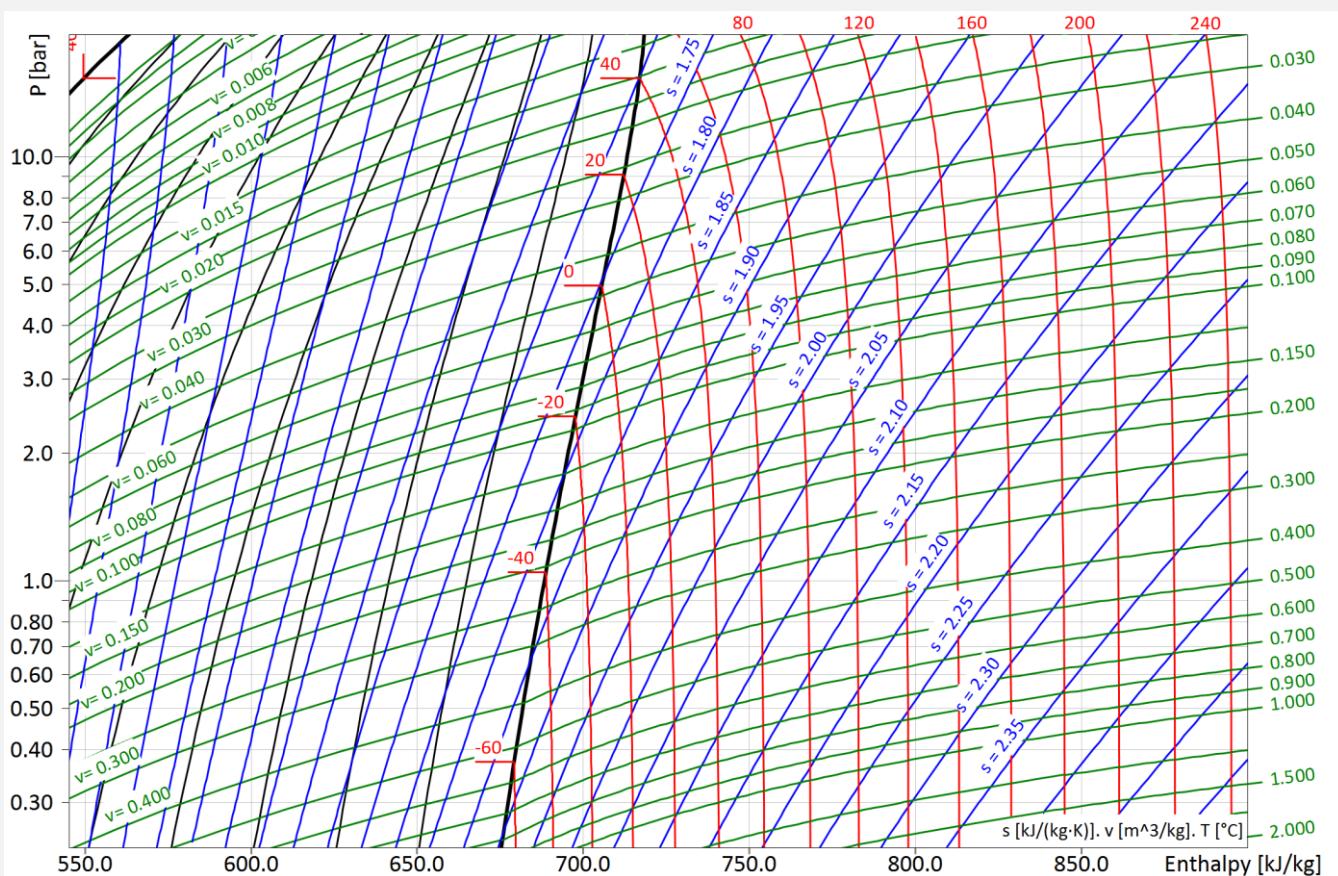
**Remarque :** On retrouve la même expression du premier principe qu'un compresseur, si ce n'est que la turbine préleve un travail au fluide ( $w_i, P_i < 0$ ), alors que le compresseur et la pompe fournissent un travail au fluide ( $w_i, P_i > 0$ ).

Dans la plupart des pompes, compresseurs et turbines, les **changements d'états doivent être évités** : des bulles de vapeur dans des pompes peuvent endommager très rapidement les composants de la pompe, et des gouttes d'eau dans une turbine peuvent en dégrader les parties mobiles en rotation rapide.

### Application – Compression et détente réversible dans un diagramme des frigoristes

Dans le diagramme ( $\log(P)$ ,  $h$ ) du fluide R22 ci-dessous :

1. Représenter une compression réversible d'un fluide d'une pression de 1 bar à 10 bar (le fluide étant initialement à 80°C). Indiquer la température finale du fluide.
2. Déterminer le travail massique indiqué  $w_i$  apporté par le compresseur pour réaliser cette transformation.
3. Représenter une compression réelle (c'est-à-dire irréversible) entre les mêmes pressions initiales et finales.
4. Quelle compression a « couté » le moins d'énergie au compresseur ? Le fluide est-il dans le même état final ?
5. Représenter une détente de 8 bar à 1 bar d'un fluide initialement à 20°C (d'abord isentropique, puis réelle).



### Rendement isentropique d'une turbine et d'un compresseur (hors-programme, mais souvent demandé)

Le rendement isentropique d'une turbine est  $\eta = \frac{w_i(\text{réel})}{w_i(\text{rev.})} = \frac{(h_s - h_e)^{\text{réel}}}{(h_s - h_e)^{\text{rev.}}} < 1$

Le rendement isentropique d'un compresseur est  $\eta = \frac{w_i(\text{rév.})}{w_i(\text{réel})} = \frac{(h_s - h_e)^{\text{rev.}}}{(h_s - h_e)^{\text{réel}}} < 1$

Ce nombre quantifie à quel point la transformation s'approche d'une transformation isentropique (souvent entre 80 et 95 %).

### Application – Compression et détente réversible

Déterminer le rendement isentropique de la compression représentée ci-dessus, sur le diagramme du R22.

Déterminer le rendement isentropique de la détente.

## III.2 – Composants avec transfert thermique fluide/extérieur

### III.2.A – Echangeur thermique simple ou double flux

#### Echangeur simple flux

Un échangeur thermique simple flux est un dispositif à une entrée et une sortie permettant un échange thermique entre le fluide et l'extérieur.

Cela s'accompagne évidemment d'un changement de température, et éventuellement d'un changement d'état (considéré isobare).



Schéma d'un échangeur simple flux



Echangeur thermique de voiture,  
Eau-air, 30x30 cm

Les échangeurs sont des composants simples, sans partie mobile. Ils sont optimisés de sorte à ce que le transfert de chaleur entre le fluide et l'extérieur y soit optimal. Le flux entrant est souvent séparé en une multitude de tuyaux de faible diamètre, permettant d'augmenter la surface de contact entre ce fluide et l'extérieur.

#### Premier principe appliqué à l'échangeur

Pour un échangeur parfaitement calorifugé, dans laquelle les variations d'énergie cinétique et potentielles sont négligeables :

## III.3 – Composants sans transferts de travail ou de chaleur

### III.3.A – Tuyère

#### Tuyère

Une tuyère est un dispositif à une entrée et une sortie permettant d'augmenter l'énergie cinétique du fluide sans apport de travail ou de chaleur.

Cela s'accompagne d'un changement de pression et de température.

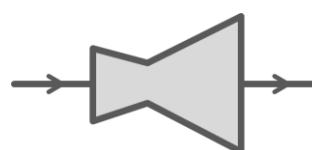


Schéma d'une tuyère



Tuyère Vulcain 2 (Ariane V), 1350 kN,  
Ejection  $320 \text{ kg.s}^{-1}$ ,  $3,60 \times 2,15 \text{ m}$

Les tuyères sont principalement employées dans le domaine spatial et militaire, afin de propulser les fusées et les missiles. La forme des tuyères est scrupuleusement choisie afin d'accélérer au mieux les gaz produits lors de la combustion des propellants (mélange de combustible et de comburant destiné à propulser une fusée). Ainsi, en sortie de la partie divergente, les gaz voyagent à plusieurs fois la vitesse du son, poussant ainsi la tuyère dans le sens opposé par conservation de l'impulsion.

#### Premier principe appliqué à la tuyère

Pour une tuyère parfaitement calorifugée, dans lequel les variations d'énergie potentielle sont négligeables :

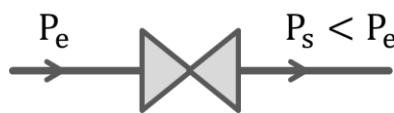
### III.3.B - Détendeur

#### Détendeur

Un **détendeur** est un composant à une entrée et une sortie permettant de diminuer la pression d'un fluide, sans échange de travail (contrairement à la turbine).

La détente s'accompagne d'une variation de température, de masse volumique, et/ou d'un changement d'état.

Schéma d'un détendeur



Détendeur de réfrigérateur (R404a),  
10x10 cm,  $P_{e,\text{max}} \approx 34 \text{ bar}$ ,  $P_s \approx 1 \text{ bar}$

**Remarque :** l'effet du détendeur sur le fluide est identique à celui de la turbine, à la différence que la turbine extrait un travail pouvant être utilisé pour produire de l'électricité ou mettre en mouvement d'autres composants. Cela dit, puisqu'une turbine coûte considérablement plus cher qu'un détendeur (et s'avère bien moins durable et robuste), on ne les utilise que dans les cas où l'extraction de travail est centrale au fonctionnement de l'installation industrielle ou domestique.

#### Premier principe appliqué au détendeur

Pour un détendeur parfaitement calorifugé, dans lequel les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables :

---



---



---

### III.3.C - Mélangeur

#### Mélangeur

Un **mélangeur** est un composant à deux entrées et une sortie permettant de mélanger deux fluides en écoulement, le plus souvent pour uniformiser leur température (mais parfois pour mélanger des espèces chimiques, ou d'autres propriétés).



Schéma de principe d'un mélangeur



Mélangeur domestique

Le mélangeur à débit variable est un composant simple présent dans chaque maison (dans les évier et les douches). Dans la très grande majorité des cas, il est utilisé pour mélanger deux fluides de même composition, mais à température différente.

#### Premier principe appliqué au mélangeur

Pour un mélangeur parfaitement calorifugé, dans lequel les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables :

---



---



---

#### Application – Température de sortie d'un mélangeur

Un robinet domestique mélange de l'eau froide, et de l'eau chaude sortant du chauffe-eau à une température et un débit ( $T_c = 90^\circ\text{C}$ ,  $D_{m,e1} = 200 \text{ g. s}^{-1}$ ) et ( $T_c = 20^\circ\text{C}$ ,  $D_{m,e2} = 400 \text{ g. s}^{-1}$ ).

Dans des applications de chimie industrielle, il est possible que les fluides réunis au sein du mélangeur ne soient pas de même nature, et notamment n'aient pas la même capacité thermique massique. L'expression des enthalpies massiques fait alors intervenir des capacités thermiques différentes pour les deux entrées.

### III.3.D - Séparateur

#### Séparateur

Un séparateur est un composant à une entrée et deux sorties permettant de séparer un mélange diphasique en liquide saturant et vapeur saturante.

Séparateur industriel,  
vapeur d'eau / huile et poussières,  
40x20 cm, 30 bar max, 250 °C max.

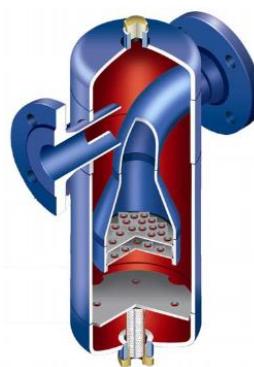


Schéma d'un séparateur

liquide / vapeur

équilibre l/v

vapeur  
saturante

liquide  
saturant

Dans de nombreux cas, on souhaite retirer une faible proportion de liquide saturant indésirable. Le composant peut alors être nommé un « dessiccateur de vapeur ». Cet élément peut par exemple être placé en amont d'une turbine à gaz, dont le fonctionnement doit être réalisé avec une vapeur aussi sèche que possible, pour éviter une détérioration rapide du composant.

#### Premier principe appliqué au mélangeur

Pour un séparateur parfaitement calorifugé, dans lequel les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables :

---



---



---

## III.4 – Bilan des composants usuels

On propose ci-dessous un tableau récapitulatif des différents composants présentés dans cette partie. On y indique la nature et le sens du transfert (chaleur, travail indiqué, ou aucun des deux) entre le fluide et le composant.  droite, on indique l'expression du premier principe sous sa forme compacte.

Composant	Rôle	$w_i$	$q$	Premier principe
Compresseur, pompe	Augmenter la pression du fluide			
Turbine	Récupérer un travail en diminuant la pression du fluide			
Ech. thermique (simple flux)	Réaliser un échange thermique avec l'extérieur			
Ech. thermique (double flux)	Réaliser un échange thermique entre deux écoulements			
Tuyère	Convertir l'enthalpie en énergie cinétique			
Détendeur	Diminuer la pression du fluide			
Mélangeur	Mélanger deux fluides			
Séparateur	Séparer un mélange diphasique			

Les expressions ci-dessus doivent être connues. Cela dit, les apprendre par coeur n'est pas recommandé ; il est tout à fait possible de les retrouver en quelques secondes, en se rappelant simplement du rôle du composant considéré, et en se rappelant son principe physique de fonctionnement.

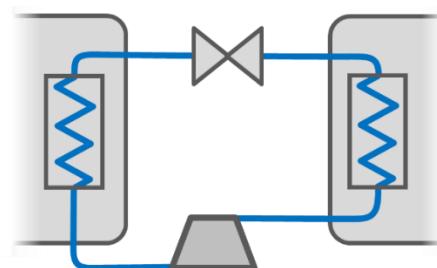
## IV – EXEMPLES DE CYCLES INDUSTRIELS CLASSIQUES

Cette partie du cours aborde des exemples classiques de cycles thermodynamiques. S'il n'est pas nécessaire d'apprendre ces exemples par coeur (car il en existe des variations infinies), il convient de bien les comprendre afin qu'ils soient très familiers.

## IV.1 - Cycle d'une pompe à chaleur

### IV.1.A - Structure schématique d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est un dispositif diatherme utilisé pour chauffer des habitations en prélevant de la chaleur de l'extérieur (un jardin, une rivière, etc.) L'habitation constitue la source chaude, le jardin la source froide, et un transfert thermique est forcée de la source froide vers la source chaude. On considérera un cas particulier fonctionnant entre un jardin à 5°C, et une maison dont les radiateurs sont à 35°C.

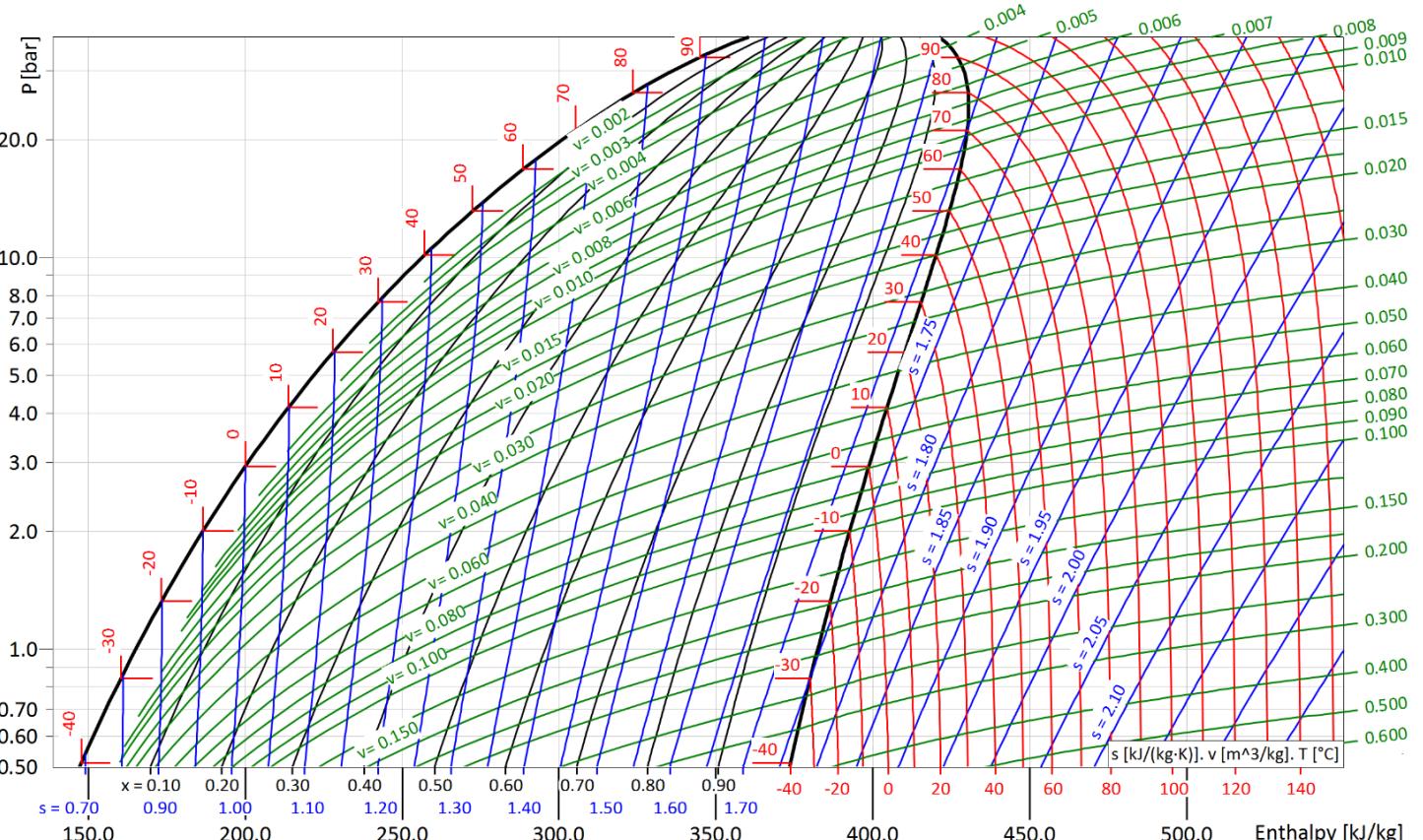


Du point de vue du fluide, on a  $Q_f > 0$  et  $Q_c < 0$ . Au niveau des échangeurs de chaleur, il ne se produit qu'un transfert thermique naturel, ce qui impose que le fluide arrivant à la source froide doit être plus froid que celle-ci. De même, lorsqu'il arrive à la source chaude, il doit être encore plus chaud. C'est le rôle du compresseur et du détendeur, qui doivent amener le fluide à la température nécessaire à ces transferts thermiques.

### IV.1.B - Cycle d'une pompe à chaleur dans un diagramme des frigoristes

Dans le diagramme ci-dessous, représenter les transformations du fluide R134a en indiquant les composants dans lesquels elles se produisent. On considérera que du côté basse pression le fluide est à 2 bar, et à que du côté haute pression, il est à 15 bar. De plus, on ajoute que :

- Le compresseur prend en entrée le fluide à l'état que vapeur saturante ;
- Le condenseur amène le fluide à l'état de liquide saturant ;



Indiquer les températures extrêmes atteintes par le fluide, et justifier que la pompe à chaleur apporte effectivement de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment.

**Remarque :** Un cycle thermodynamique est parcouru dans le même sens, quel que soit le diagramme considéré : **sens horaire pour les moteurs ; sens trigonométrique pour les machines frigorifiques.**

### IV.1.C – Efficacité de la pompe à chaleur

L'efficacité d'une pompe à chaleur est définie par :

$$\epsilon = -\frac{Q_c}{W} = \frac{\mathcal{P}_c}{\mathcal{P}_i} = -\frac{q_c}{w} = -\frac{\text{énergie libérée par le fluide dans le condenseur}}{\text{travail massique fourni par le compresseur}}$$

Dans le cas particulier représenté sur le diagramme thermodynamique ci-dessus, on obtient :

Sachant que les sources chaude et froide sont à 35°C et 5°C, l'expression de l'efficacité de Carnot donne :

Comme prévu, l'efficacité de Carnot est supérieure à l'efficacité réelle. Cela est dû aux différentes irréversibilités, qu'on constate au niveau de la compression et de la détente sur le diagramme des frigoristes.

**Remarque :** en réalité, l'évaporation et la condensation sont poussées un peu au-delà de la saturation (dans le domaine du liquide sous-refroidi à gauche, et de la vapeur surchauffée à droite) :

- Le **sous-refroidissement** permet d'augmenter la longueur du palier de condensation, donc d'augmenter l'efficacité de la machine.
- La **surchauffe** permet de s'affranchir du risque d'envoyer des gouttes de liquide dans le compresseur, ce qui pourrait l'endommager.

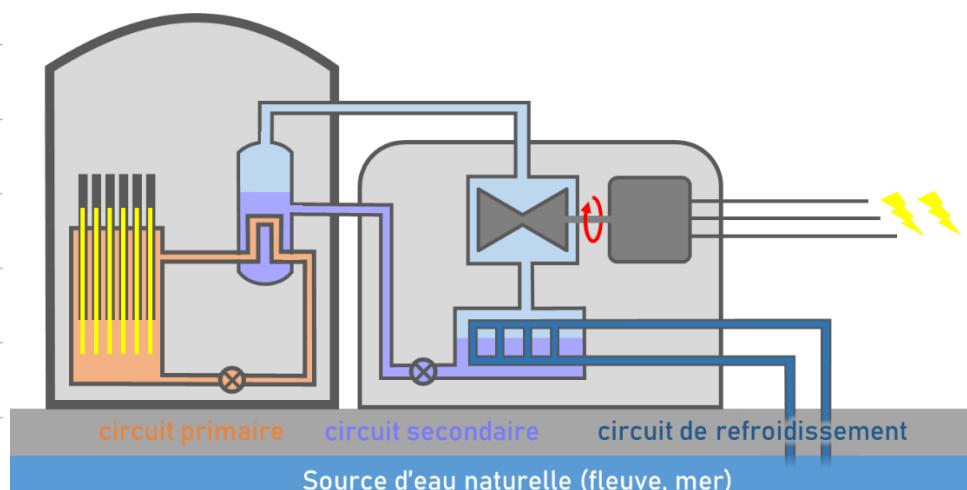
## IV.2 – Cycle de Rankine

Qu'elles soient à charbon, à gaz, à bois, ou nucléaire, toutes les centrales de production électrique fonctionnent sur le même principe simple : générer de la chaleur pour chauffer un fluide, qui circule dans un circuit comprenant une turbine dont le rôle est d'en extraire du travail mécanique.

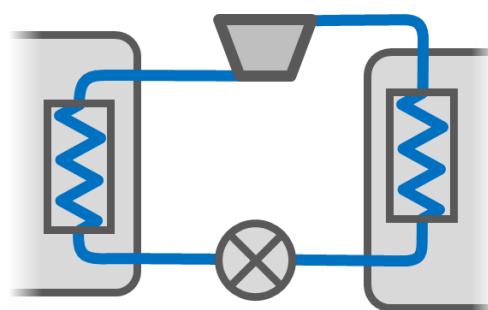
On considérera un cas particulier d'un circuit secondaire opérant entre une source chaude à 300°C (l'eau du circuit primaire) et une source froide à 15°C (l'eau d'un fleuve dans le circuit tertiaire).

### IV.2.A – Structure schématique d'une centrale nucléaire

La représentation schématique d'une centrale nucléaire est représentée ci-dessous :



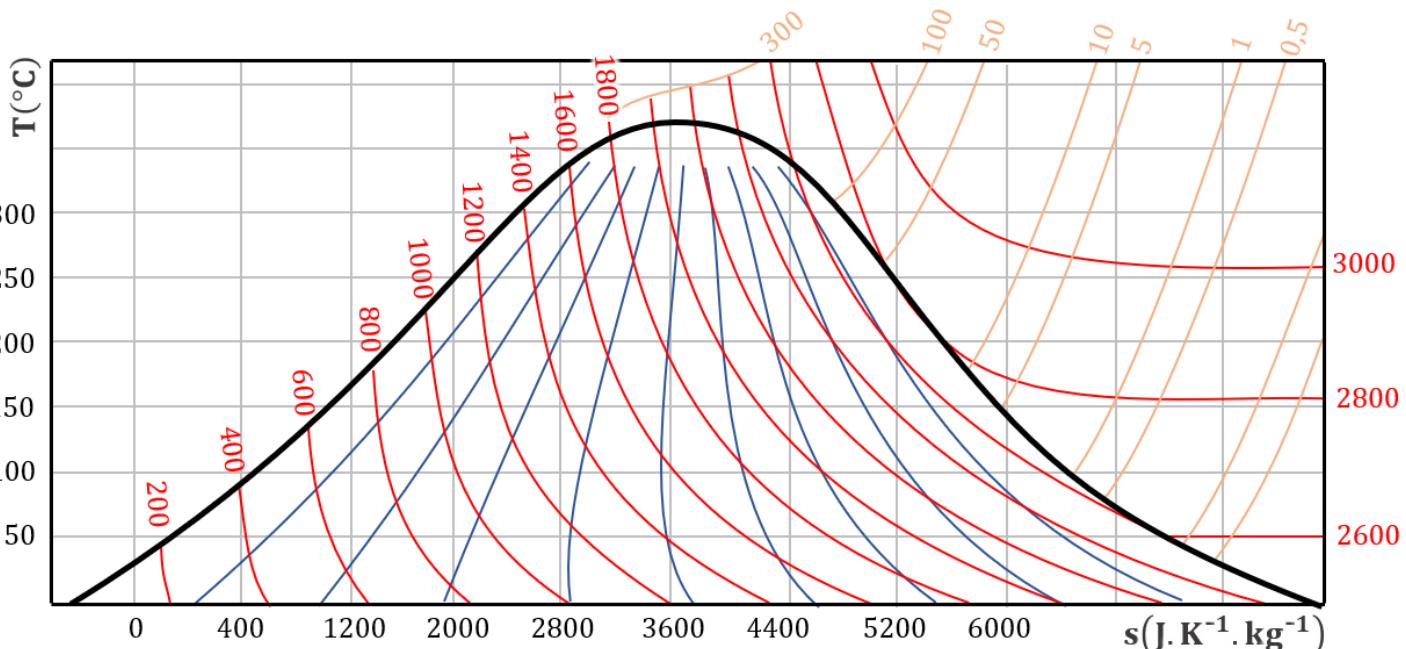
La partie génératrice d'énergie utile (travail mécanique récupéré par la turbine) est le circuit secondaire. On étudie donc ci-dessous cette partie de la centrale, dans laquelle le fluide tourne en circuit fermé entre la source chaude et la source froide :



#### IV.2.B – Cycle de Rankine dans un diagramme entropique

Représenter les transformations du fluide R718 (c'est-à-dire de l'eau) en indiquant les composants dans lesquels elles se produisent. On considérera que le fluide atteint des températures extrêmales 275°C et 30°C. De plus, on ajoute que :

- La turbine prend en entrée un fluide à l'état de vapeur saturante, à haute température ;
- Le condenseur prend en entrée le fluide à basse température, et l'amène à l'état de liquide saturant.



Indiquer les pressions extrêmales atteintes par le fluide, et justifier que le système transforme de la chaleur en travail :

#### IV.2.C – Rendement du cycle de Rankine

Le rendement d'un moteur est défini par :

$$\eta = -\frac{W}{Q_c} = -\frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_c} = -\frac{w}{q_c} = \frac{\text{travail récupéré dans la turbine}}{\text{chaleur fournie par la source chaude}}$$

Dans le cas particulier représenté sur le diagramme thermodynamique ci-dessus, on obtient :

Sachant que le circuit primaire d'un réacteur nucléaire est d'environ 300°C, et que la source froide est l'eau d'un fleuve à 15°C, l'expression du rendement de Carnot donne :

---

On retrouve encore une fois un rendement moindre que celui de Carnot.