



Département Energétique

Machines Thermiques

Deuxième année du cycle Ingénieur

Prof. N. BOUTAMMACHTE

Année universitaire 2022/2023

Sommaire

- CH1: Introduction aux machines thermiques
- CH2: Rappels thermodynamiques
- CH 3:Cycles à vapeur
- CH 4: Cycles à gaz**
- CH 5: Machines frigorifiques**

2

جامعة مولاي إسماعيل
UNIVERSITÉ MOULAY ISMAÏL

المدرسة الوطنية العليا للفنون والمهن
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET MÉTIERS

Chapitre 1: Introduction aux Machines Thermiques

Prof. BOUTAMMACHTE 3

1. Définitions

➤ **Machine thermique:**

- C'est un mécanisme qui fait subir à un **fluide** des **transformations cycliques**;
- Au cours de ces transformations, le **fluide** échange de **l'énergie** avec des **sources de chaleurs** (en général deux sources de chaleur).

➤ **Source de chaleur**

- C'est un système qui peut **échanger** de la chaleur avec l'extérieur **sans que sa température change**;
- La transformation d'une source de chaleur est nécessairement isotherme.

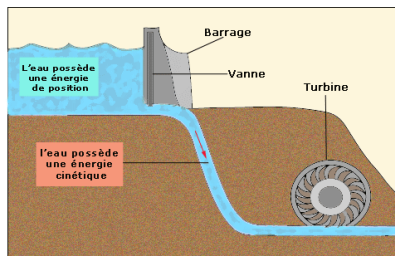
➤ **Exemple:** l'atmosphère, le soleil, les océans, la combustion...

Prof. BOUTAMMACHTE 4

2. Types des machines thermiques

➤ Machines Motrices:

- Ce sont des machines qui convertissent une **énergie d'entrée** en **énergie mécanique**;
- Ces machines suivent le principe stipulant que **l'existence** d'un **gradient** d'un **potentiel** (pression, température, potentiel chimique, énergie potentielle, etc) présente une occasion pour **produire** un **travail**.



Prof. BOUTAMMACHTE

5

2. Types des machines thermiques

➤ Machines Motrices thermique

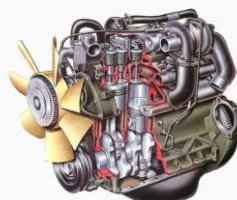
Ces machines **reçoivent** une quantité de **chaleur** pour transformer une partie en travail **mécanique**.



Centrale Thermique



Turbines à gaz



Moteur Diesel



Moteur Stirling

Prof. BOUTAMMACHTE

6

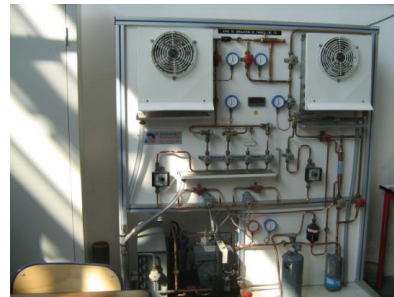
2. Types des machines thermiques

➤ Machines réceptrices:

Ce sont des machines qui **reçoivent** un **travail** mécanique pour effectuer une fonction donnée: Chauffer, refroidir, comprimer, etc.



Machine frigorifique



Pompe à chaleur

Prof. BOUTAMMACHTE

7

Objectif du cours

- Comprendre le principe de fonctionnement d'un nombre de **machines thermiques** que peut rencontrer un **ingénieur** dans **l'industrie**:
 - Centrales thermiques (à gaz, à vapeur, cycle combiné);
 - Moteurs thermiques (Diesel, essence, Stirling, etc);
 - Compresseurs...
- Pouvoir estimer les **performances** de ces machines et leur potentiel d'optimisation;
- Appliquer les principes de la thermodynamique sur des cas réels.

Prof. BOUTAMMACHTE

8

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

Sommaire

1. Définitions
2. Premier principe de la thermodynamique
3. Deuxième principe de la thermodynamique
4. Equilibre de phases
5. Diagrammes thermodynamiques

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définition: variables d'état

- En thermodynamique, les variables d'état sont des **propriétés indépendantes** qui servent à définir **l'état du système**.
- Autrement dit, ce sont des paramètres indépendants qui permettent le **contrôle de l'état thermodynamique** de ce système. Généralement il sont au nombre de quatre :

- **Température** : c'est un paramètre macroscopique qui mesure le degré de l'agitation moléculaire.
- **Pression** : c'est un paramètre macroscopique qui mesure l'intensité de chocs entre les molécules d'un fluide et entre ces molécules et les parois*et les interactions entre ces molécules.
- **Volume** : c'est un paramètre géométrique qui mesure l'espace occupé par la matière.
- **Masse** : c'est un paramètre qui mesure la quantité de matière.

Prof. BOUTAMMACHTE

11

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions: Les énergies transitoires (chaleur et travail)

Quand un **système** est en **contact** avec son **entourage**, il se produit des transformations qui sont caractérisées par des **échanges** d'énergies entre le système et l'entourage.

>> Ces énergies sont appelées **énergies de transition** ou **transitoires**.

Prof. BOUTAMMACHTE

12

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions: Les énergies transitoires: chaleur et travail

➤ **Le travail:**

- Lorsqu'un corps pousse ou soulève un autre corps, on dit que ce corps **fournit de l'énergie à l'autre corps** sous forme de **travail**.
- En physique, le travail est donné par **une force** qui s'exerce sur une **certaine distance** (déplacement), ce qui se traduit par l'équation (travail mécanique):

$$W = F \times L$$

$$[Travail] = [force] [distance]$$

Prof. BOUTAMMACHTE

13

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions: Notion d'énergie d'un système

En thermodynamique macroscopique, les **énergies** pour un **système** donné se résument en **trois formes** : Interne, Cinétique et Potentielle:

• **L'énergie interne:**

C'est l'ensemble des **énergies** contenues dans la **matière** et **stockées** à l'échelle de **l'atome** et de la **molécule**, comme les énergies de liaisons dans les molécules et l'énergie de vibration. Elle est indiquée par le symbole **U**.

• **L'énergie cinétique :**

Elle est relative au **mouvement** d'un objet de masse **m** et qui se déplace avec une vitesse **V** dans l'espace.

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

Prof. BOUTAMMACHTE

14

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définition: Notion d'énergie d'un système

- **L'énergie potentielle :**

Elle est relative à la présence d'un **champ de forces** agissant sur un système macroscopique : électrique, magnétique ou gravitationnel.

- **L'énergie totale du système:**

Elle est la **somme** de l'énergie interne, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle :

$$E = E_p + E_c + U$$

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

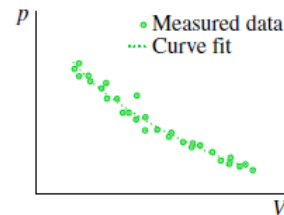
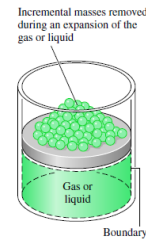
1. Définitions: L'équilibre thermodynamique

- En **mécanique**, un système est en **équilibre** lorsque **la somme des forces appliquées** sur lui est **nulle**.
- Un **équilibre thermodynamique** est établi lorsqu'il y'a **équilibre mécanique**, **équilibre thermique** et **équilibre chimique**.
- Généralement, on parle d'un **équilibre thermodynamique** lorsque les variables d'état comme **la température**, **la pression**, **le volume** , **la composition chimique** et la **masse** sont **constantes**.

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définition: Transformation quasi statique

- Pour un système qui **évolue dans le temps**, on ne peut pas lui associer des variables d'état.
- Cependant, si cette évolution est suffisamment **lente**, on peut imaginer comme si elle est constituée d'une succession de **d'états d'équilibre** où l'on peut appliquer les **lois de la thermodynamique**. On parle donc d'une transformation **quasi-statique**.
- Si en plus, on peut suivre le chemin inverse, on dit que la transformation est **réversible**.
- Une transformation réversible est une **transformation idéale**.



Prof. BOUTAMMACHTE

17

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions: Capacité thermique

On définit la **capacité thermique massique** d'un corps comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter d'un Kelvin la température d'un kilo de ce corps :

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (\text{Capacité thermique d'un système solide})$$

1. Définitions: Equation d'état

Pour un système en équilibre thermodynamique, on désigne par une **fonction d'état** toute équation de la forme : **f(P,V,T) = 0**, permettant de relier les variables d'état: Pression, Température et Volume.

➤ **Exemple:** $pV=nRT$

Prof. BOUTAMMACHTE

18

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions:

➤ Formule générale pour le calcul du travail mécanique

$$\delta W = -p_{ext} dV$$

➤ Pour une transformation réversible:

A chaque instant, la pression extérieure est égale à la pression du gaz.

C'est à dire: $p_{ext} = p$

D'où:

$$W = \int_i^f -p dV$$

Prof. BOUTAMMACHTE

19

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions:

➤ Formule générale pour le calcul du travail mécanique

➤ Exemple: compression d'un gaz

On veut comprimer une mole d'un gaz parfait d'une manière isotherme ($T=25^\circ\text{C}$) de la pression $P_1=1$ bar à la pression $P_2=5$ bars. Calculer le travail de compression si:

- La transformation est réversible;
- La transformation est brutale (en appliquant une pression constante de 5 bars).

Prof. BOUTAMMACHTE

20

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

1. Définitions: Calcul de chaleur

- Il existe deux formules équivalentes pour le calcul de la quantité de chaleur:

$$\delta Q = c_v dT + l dV$$

$$\delta Q = c_p dT + h dp$$

c_v , c_p , l et h sont appelés les coefficients **calorimétriques**.

- Pour un gaz parfait:
(cp et cv sont molaires)

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1}$$

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

- Pour les liquides et les solides: $c_v = c_p = c$

Prof. BOUTAMMACHTE

21

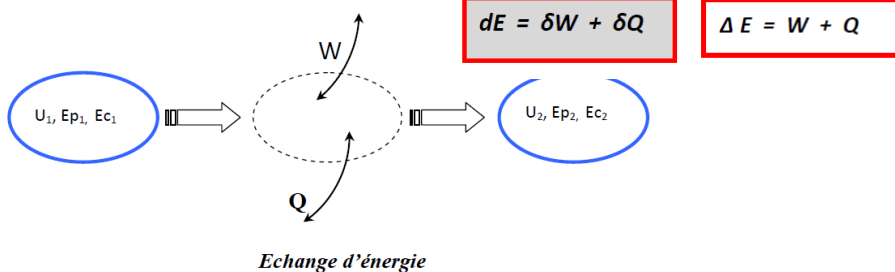
Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe de la thermodynamique

Le **premier principe** de la thermodynamique exprime la **conservation d'énergie**, il stipule que l'énergie ne peut être ni détruite ni créée.

- Premier principe de la thermodynamique pour un système fermé :**

La somme des variations de l'énergie interne (U), de l'énergie cinétique (Ec) et de l'énergie potentielle (Ep) d'un système, est égale à la somme des travaux et chaleurs échangés avec l'extérieur.



Prof. BOUTAMMACHTE

22

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe de la thermodynamique

- Lorsque la transformation se déroule **sans variation d'énergie cinétique ou potentielle**, le premier principe s'exprime par l'égalité :

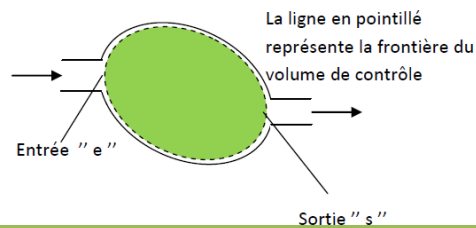
$$dU = \delta W + \delta Q$$

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe de la thermodynamique

▪ Volume de contrôle

- On appelle volume de contrôle le **volume occupé par un système thermodynamique** donné.
- La frontière de ce système thermodynamique représente la surface délimitant le volume de contrôle. Cette surface est généralement munie d'ouverture d'entrée et de sortie à travers lesquelles la masse traverse le volume de contrôle.
- La surface délimitant un volume de contrôle peut être physique ou bien virtuelle.

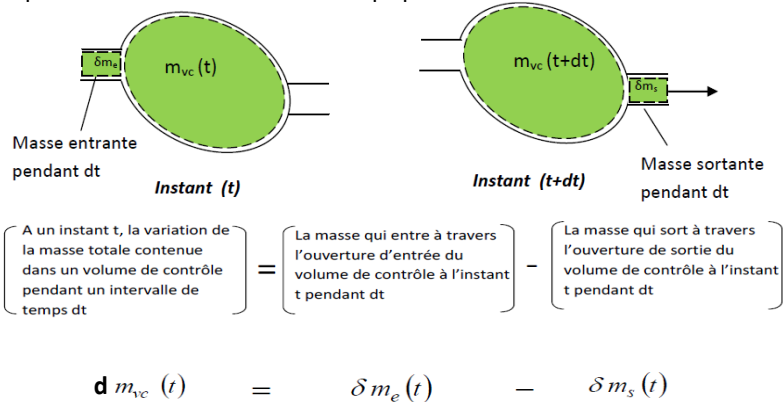


Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe de la thermodynamique

• Bilan de masse à travers un volume de contrôle

Le bilan de masse à travers un volume de contrôle permet de mettre en équation le principe de **conservation de masse** qui peut être formulé comme suit :



Prof. BOUTAMMACHTE

25

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe de la thermodynamique

• Bilan de masse à travers un volume de contrôle

Ou bien par unité de temps :

$$\frac{d m_{vc}}{dt}(t) = \frac{\delta m_e}{dt}(t) - \frac{\delta m_s}{dt}(t)$$

Ou encore :

$$\frac{d m_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

Cas particuliers : Lorsqu'il s'agit d'un **régime permanent**, la **masse totale** contenue dans le volume de contrôle **ne varie pas**, donc le débit massique qui entre sera égale à celui qui sort :

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$$

Prof. BOUTAMMACHTE

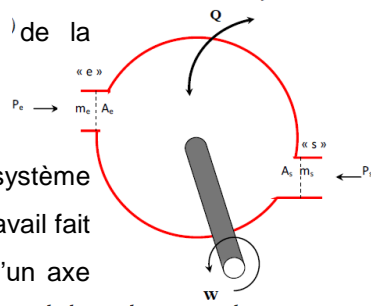
26

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe de la thermodynamique

• Premier principe pour un système ouvert

- Considérons une machine munie de deux ouvertures (e : entrée et s : sortie) par lesquelles le fluide en circulation entre et sort de la machine.



- Cette machine est équipée d'un système mécanique qui permet de récupérer le travail fait par le fluide en circulation, au moyen d'un axe qui tourne (travail d'axe: shaft work).

Prof. BOUTAMMACHTE

27

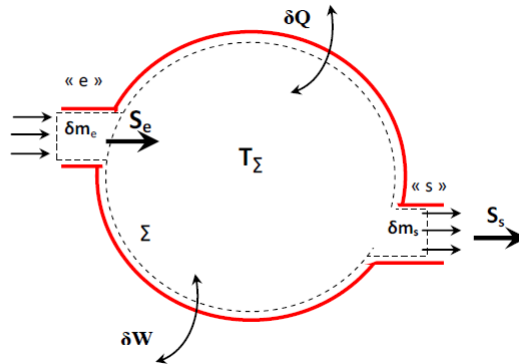
$$dE = (h_e + Ec_e + Ep_e) \delta m_e - (h_s + Ec_s + Ep_s) \delta m_s + \delta W + \delta Q$$

28

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

2. Premier principe pour un système ouvert

Le système peut être remplacé par le volume de contrôle suivant :



$$dE = (h_e + e_{c,e} + e_{p,e})\delta m_e - (h_s + e_{c,s} + e_{p,s})\delta m_s + \delta W + \delta Q$$

Prof. BOUTAMMACHTE

29

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe de la thermodynamique

- Le second principe de la thermodynamique est une **nécessité** qui résulte des **insuffisances** du **premier principe**:
- Le premier principe nous renseigne sur l'**équivalence** entre la **chaleur Q** et le **travail W**, et ne nous **renseigne pas** sur le **sens d'évolution** de la transformation;
- Le premier principe s'applique même à une transformation **impossible** :

Ainsi avec 1kg d'eau à 30°C et 1Kg d'eau à 10°C on obtient 2 kg d'eau à 20°C.
Mais le premier principe permet d'admettre la possibilité d'obtenir 1kg d'eau à 35°C et 1kg d'eau à 5°C.

Prof. BOUTAMMACHTE

30

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe de la thermodynamique

• **L'entropie:**

L'entropie (S) d'un système peut être définie comme étant une **fonction d'état** qui a les propriétés suivantes :

- **S** est extensive ;
- **S** mesure l'état de **désordre** d'un système: **plus le désordre augmente plus l'entropie augmente**;
- Un système qui évolue **spontanément** dans le temps, sans échanger de la chaleur, atteint l'**équilibre** lorsque **S** devient **maximale** ;

Prof. BOUTAMMACHTE

31

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe de la thermodynamique

Calcul de l'entropie:

Le deuxième principe nous donne la relation permettant le calcul de la variation d'entropie lors d'une transformation:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta \sigma$$

dS Variation élémentaire de l'entropie;

$\frac{\delta Q}{T}$: La chaleur échangée sur la température du système;

$\delta \sigma$: Un terme **positif** ou **nul**. Il représente **l'entropie créée** lors d'une transformation **irréversible** ayant lieu à **l'intérieur** du système.

➤ Il est **nul** dans le cas d'une **transformation réversible**.

Prof. BOUTAMMACHTE

32

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe pour un système ouvert

Quelques propriétés de l'entropie:

- L'entropie d'un système **augmente** quand il reçoit une **quantité de chaleur**;
- L'entropie d'un système augmente suite à des **causes d'irréversibilité** ayant lieu à l'intérieur du système;
- L'entropie d'un système **peut diminuer** quand il **donne** une quantité de **chaleur**;
- L'entropie **ne change pas suite** à un échange de **travail**.

$$dS = \frac{\delta Q}{T_{\Sigma}} + \delta\sigma$$

Prof. BOUTAMMACHTE

33

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe pour un système ouvert

➤ Calcul de l'entropie:

- Il **n'existe pas** de formules permettant le **calcul** du terme **$\delta\sigma$** ;
- Pour calculer la variation de l'entropie lors d'une transformation, on **imagine** que le système a évolué en suivant une transformation **réversible** avec le même état initial et final;

Etant donné que l'entropie est une fonction d'état, et sa variation ne dépend que de l'état initial et final, la valeur trouvée par le chemin imaginaire est égale à la valeur de la variation suivant le chemin réel.

Prof. BOUTAMMACHTE

34

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe pour un système ouvert

Causes d'irréversibilité:

- L'existence de **gradient d'un potentiel** (température, pression, ...) **non exploité**;
- Présence des **effets dissipatifs** (frottement mécanique, visqueux, effets Joule,...).

Prof. BOUTAMMACHTE

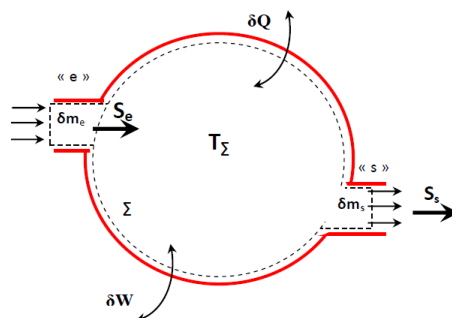
35

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe pour un système ouvert

➤ Calcul de la variation d'entropie pour un système ouvert:

Considérons un système **ouvert** qui échange de **l'énergie** et de la **matière** avec l'extérieure :



Prof. BOUTAMMACHTE

36

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe pour un système ouvert

Le bilan entropique pour ce système s'écrit :

$$\left(\begin{array}{c} \text{Variation d'entropie} \\ \text{totale du système} \\ \text{pendant dt} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Variation d'entropie} \\ \text{due à l'échange de} \\ \text{chaleur avec} \\ \text{l'extérieure pendant dt} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Echange d'entropie à} \\ \text{travers l'échange de} \\ \text{masse pendant dt} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Production interne} \\ \text{d'entropie pendant dt (à} \\ \text{cause des phénomènes} \\ \text{irréversible)} \end{array} \right)$$

$$dS_{\Sigma} = \oint_{\text{frontière du système}} \frac{\delta Q_e}{T_{\Sigma}} + \delta m_e S_e - \delta m_s S_s + \delta \sigma_{\Sigma}$$

S_e : Entropie massique des éléments entrant

S_s : entropie massique des éléments sortant

δQ_e : Chaleur échangée avec l'extérieur à travers les frontières de Σ

$\delta \sigma_{\Sigma}$: La production d'entropie due aux irréversibilités internes.

Prof. BOUTAMMACHTE

37

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

3. Deuxième principe pour un système ouvert

Lorsqu'il n'y a pas de production d'entropie à l'intérieur du système, le terme $\delta \sigma$ est nul, il s'agit dans ce cas d'une **évolution réversible**.

$$dS_{\Sigma} = \oint_{\text{frontière du système}} \frac{\delta Q_e}{T_{\Sigma}} + dm_e S_e - dm_s S_s$$

Prof. BOUTAMMACHTE

38

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

- Un **corps pur** est un élément constitué d'une **seule espèce chimique** simple ou composée;
- Un corps pur peut être dans l'un **des trois états physiques** de la matière;
- Les **solides** possèdent un **volume défini** et sont **incompressibles**. Leur propriété la plus caractéristique est de posséder une forme propre;
- A l'état **solide**, les molécules, atomes ou ions constituent des **cristaux** où ils sont presque **immobiles** sous l'action de **forces d'interaction** plus ou moins intenses;
- Ce sont ces forces d'interactions et leur orientation qui donnent la forme propre aux solides;
- Les **fluides** n'ont pas de forme propre, ils prennent la forme de leur contenant et peuvent circuler dans des canalisations.

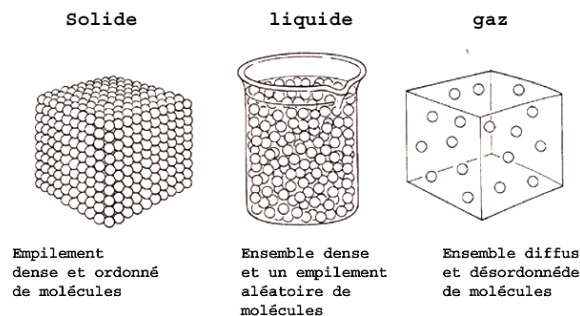
Prof. BOUTAMMACHTE

39

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Changement de phase:



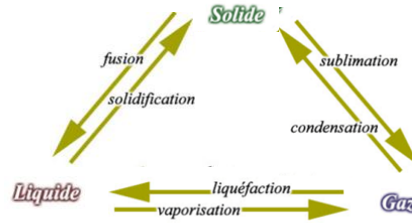
- On appelle **changement de phase** (ou d'état), **le passage** d'un corps d'une **phase à une autre**. On distingue les phases gazeuse, liquide et solide.
- Une substance sera dans **une phase donnée** en fonction de la **température** et de la **pression** du milieu.

Prof. BOUTAMMACHTE

40

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur



• Exemple :

A $P = 1 \text{ atm}$, l'eau existe à l'état liquide entre 0 et $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A $P = 1 \text{ atm}$, l'eau existe à l'état de glace pour $t < 0^{\circ}\text{C}$.

A $P = 1 \text{ atm}$, l'eau existe à l'état gazeux pour $t > 100^{\circ}\text{C}$.

- Le **passage d'une phase à une autre** s'accompagne d'une **absorption** ou d'un **dégagement** de **chaleur** et d'une variation de la **densité** de la substance.

Prof. BOUTAMMACHTE

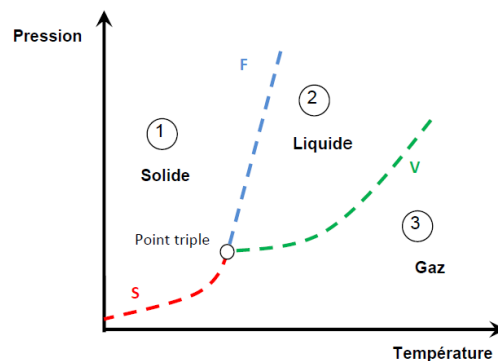
41

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Diagramme d'état:

Le **diagramme d'état** (p - T) permet de visualiser l'**influence** de la **pression** et la **température** sur les **états physiques** d'un **corps pur**.



Prof. BOUTAMMACHTE

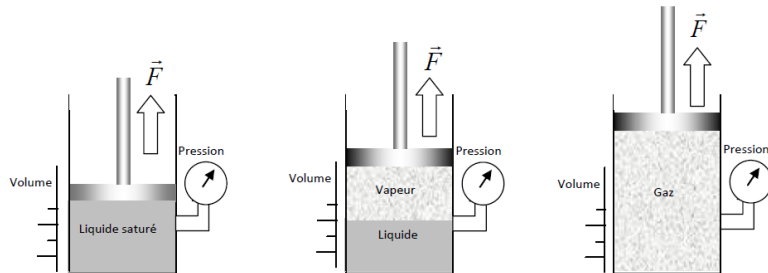
42

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Elaboration des courbes de changement de phase liquide-vapeur sur le diagramme (P,V):

En utilisant un dispositif expérimental qui permet en même temps de mesurer la pression et le volume. On effectue une série d'expériences isothermes (en faisant varier le volume) qui correspondent chacune à une température fixe donnée.



Prof. BOUTAMMACHTE

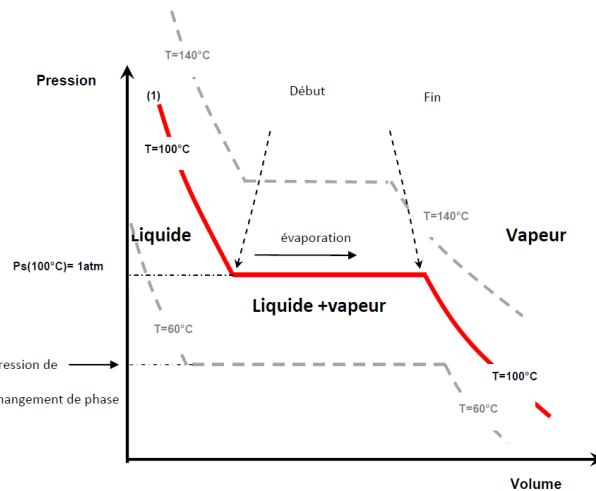
43

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Pour la valeur de la température de 100°C par exemple, on obtient la courbe (1).

Et en augmentant à chaque fois la température, on obtient un réseau de courbes isothermes qui correspondent chacune à une température donnée.



Prof. BOUTAMMACHTE

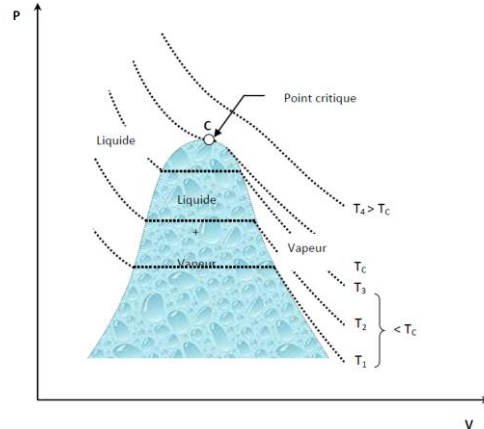
44

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

- Lorsqu'on relie les points de chaque isotherme où **l'évaporation commence** et les points où **l'évaporation se termine**, on obtient une courbe sous forme de **cloche**, appelée **courbe de saturation**.

- A droite de la cloche nous n'avons que la phase vapeur et à gauche nous n'avons que la phase liquide.
- A l'intérieur de la cloche on a un mélange liquide-vapeur.

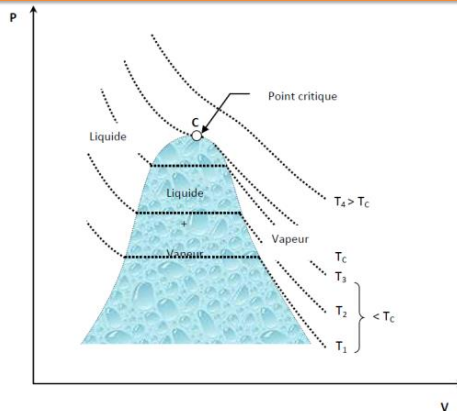


Prof. BOUTAMMACHTE

45

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur



- A l'intérieure de la cloche, nous avons la coexistence de la phase liquide et la phase vapeur.
- Cette zone est appelée **zone de saturation**. On parle alors d'un **liquide** ou d'une **vapeur saturée**. Le sommet de la cloche est appelé **point critique**.

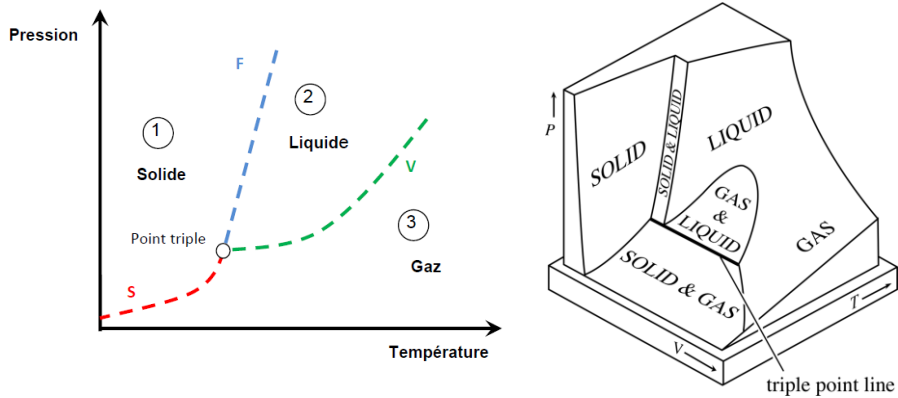
Prof. BOUTAMMACHTE

46

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Diagramme d'état:



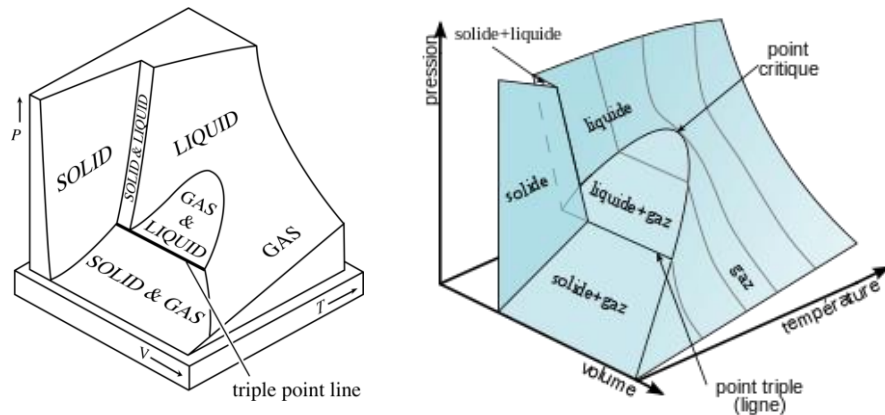
Prof. BOUTAMMACHTE

47

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Diagramme d'état:



Prof. BOUTAMMACHTE

48

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

4. Equilibre de phases d'un corps pur

Titre en Vapeur:

Lorsqu'une substance est **en partie liquide** et en partie **vapeur** à la température de saturation, on parle **d'équilibre liquide – vapeur** et on définit le **titre de la vapeur X_v** par :

$$X_v = \frac{\text{Masse de vapeur}}{\text{Masse totale}} = \frac{\text{Nombre de moles vapeur}}{\text{Nombre de moles total}}$$

Pression et température de saturation:

Dans la zone de saturation, pour chaque **température** existe une **seule** valeur de la **pression** qui est appelée **pression de saturation**.

Exemple: pour l'eau pure, la pression de saturation à la température 100°C est égale à 1 bar : $P_s(100^\circ\text{C}) = 1 \text{ bar}$. Ça veut dire qu'on ne peut évaporer l'eau à la pression atmosphérique qu'à la température de 100°C.

Prof. BOUTAMMACHTE

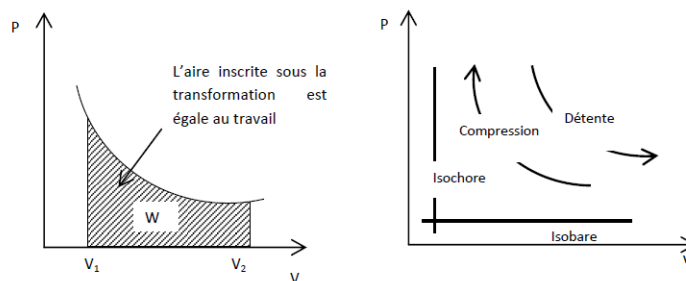
49

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

5. Diagrammes thermodynamiques

Diagramme de Clapeyron: (p,v)

- C'est le diagramme qui donne la pression en ordonnées et le volume en abscisses;
- Il permet de calculer le travail utile dans le cas des systèmes fermés.



Prof. BOUTAMMACHTE

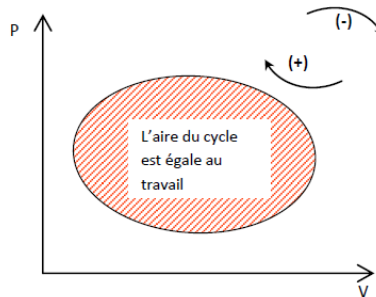
50

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

5. Diagrammes thermodynamiques

Diagramme de Clapeyron: (p,V)

Dans le cas d'un cycle tracé dans le diagramme de Clapeyron, l'aire du cycle est égale au travail W , le signe étant donné par le sens de parcours.



Prof. BOUTAMMACHTE

51

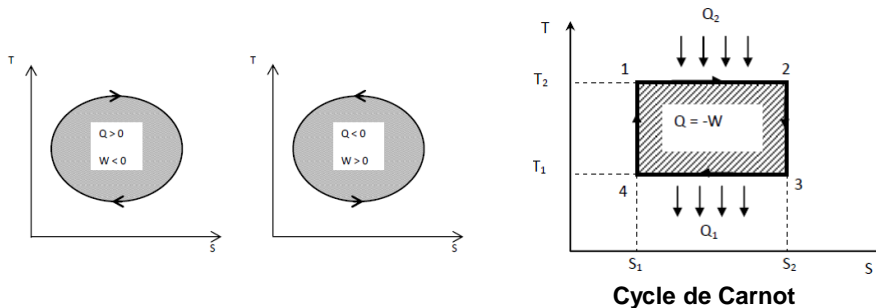
Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

5. Diagrammes thermodynamiques

Diagramme entropique: (T,s)

Dans le cas d'un cycle, la courbe est fermée et la chaleur est donnée par l'aire intérieure à la courbe, son signe étant donné par le sens de parcours.

$$Q_{\text{réversible}} = \int T \, ds$$

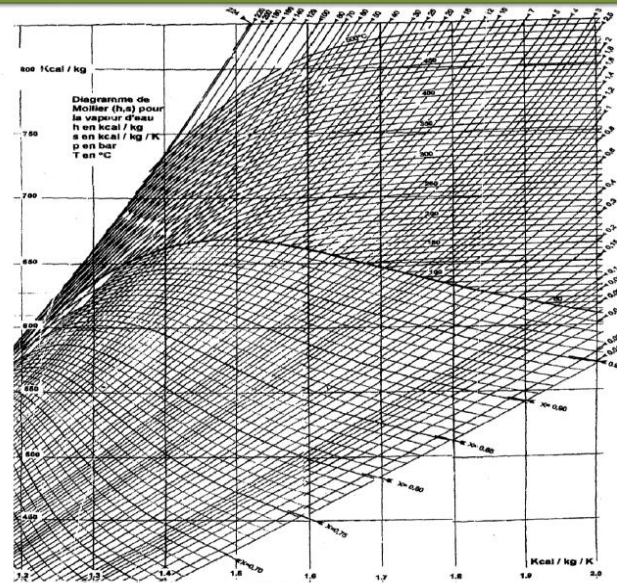


Prof. BOUTAMMACHTE

52

Chapitre 2: Rappels thermodynamiques

Diagramme de Mollier: (h,s)



h en kcal/kg
S en kcal/kg/K
T en °C
p en bar

55

Chapitre 3: Cycles à vapeur

Sommaire

1. Introduction aux centrales à vapeur
2. Principe de fonctionnement
3. Cycle idéal de Rankine
4. Cycle de Rankine modifié

1. Introduction aux centrales à vapeur

- ▶ Les cycles à vapeur sont d'une grande importance. Ils sont utilisés avec des sources d'énergie **renouvelables** ou **non renouvelables**;
- ▶ Les cycles à vapeur utilisent **l'eau** comme fluide de travail;
- ▶ Le **cycle de base** des centrales à vapeur est appelé **cycle de RANKINE**.



Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Il existe 4 types de centrales à vapeur selon la source de chaleur:

- Centrales à combustibles fossiles (Charbon, fioul, etc);
- Centrales nucléaires (le rôle de la chaudière est joué par un réacteur nucléaire);
- Centrales solaires (le rôle de la chaudière est joué par un champs solaire);
- Centrales géothermiques (utilisant l'énergie géothermique).

Prof. BOUTAMMACHTE

59

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales à combustibles fossiles (Charbon, fioul, etc):



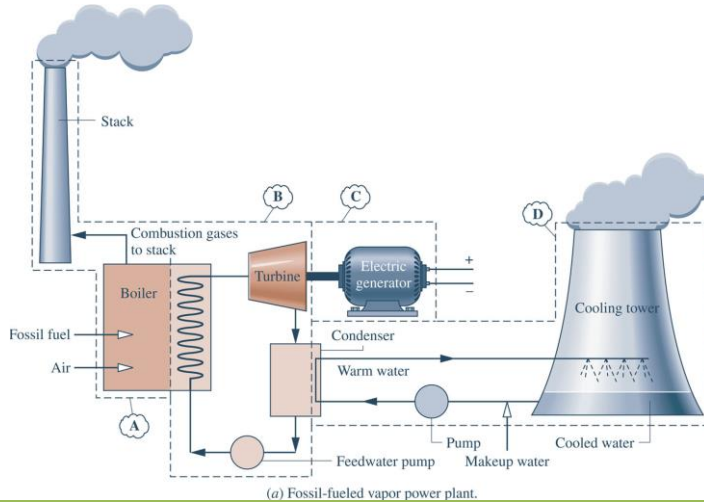
Prof. BOUTAMMACHTE

60

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales à combustibles fossiles (Charbon, fuel, etc):



Prof. BOUTAMMACHTE

61

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales Nucléaires:



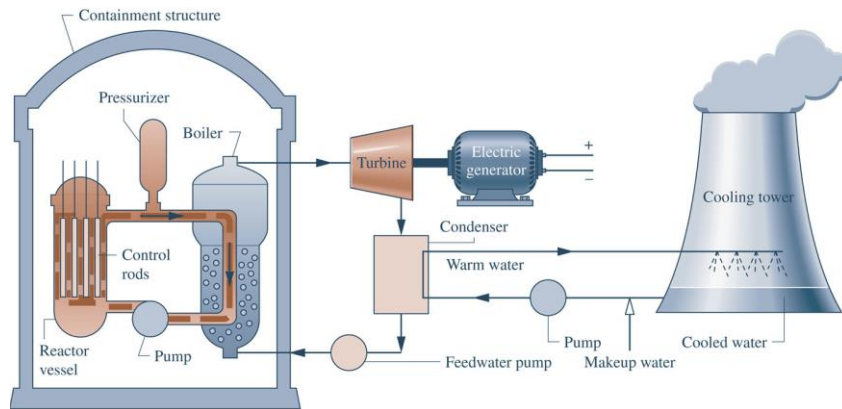
Prof. BOUTAMMACHTE

62

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales Nucléaires:



(b) Pressurized-water reactor nuclear vapor power plant.

Prof. BOUTAMMACHTE

63

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales solaires:



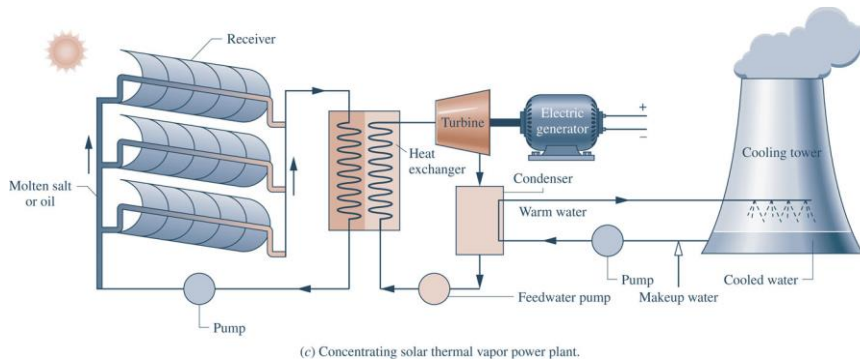
Prof. BOUTAMMACHTE

64

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales solaires:



Prof. BOUTAMMACHTE

65

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales géothermiques:



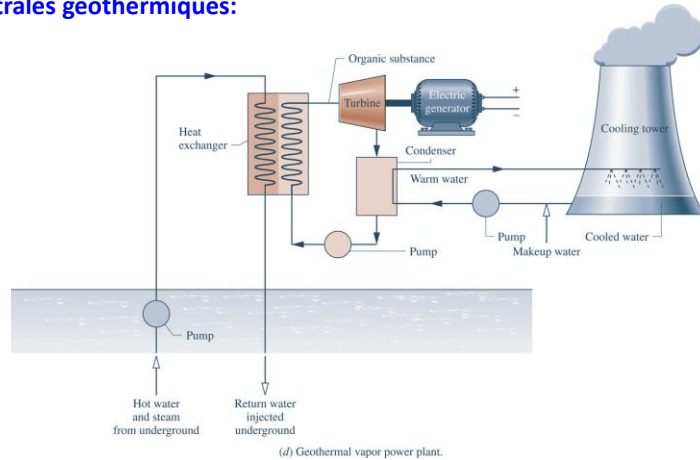
Prof. BOUTAMMACHTE

66

Chapitre 3: Cycles à vapeur

1. Introduction aux centrales à vapeur

Centrales géothermiques:



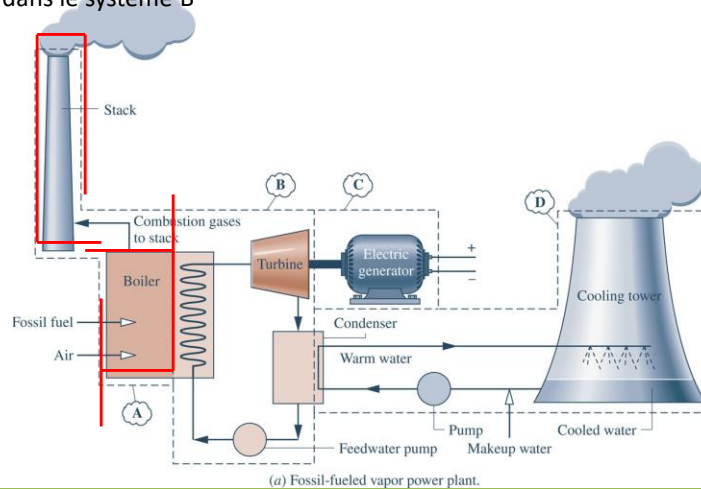
Prof. BOUTAMMACHTE

67

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Le système A délivre une quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau circulant dans le système B



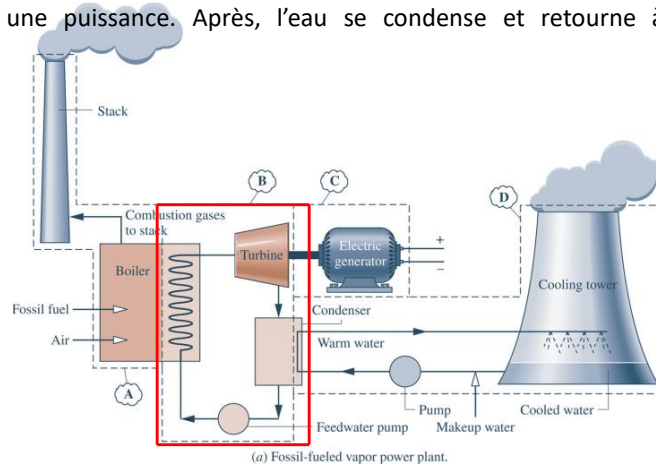
Prof. BOUTAMMACHTE

68

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Dans le système B, la vapeur générée se détend dans les turbines développant une puissance. Après, l'eau se condense et retourne à la chaudière.



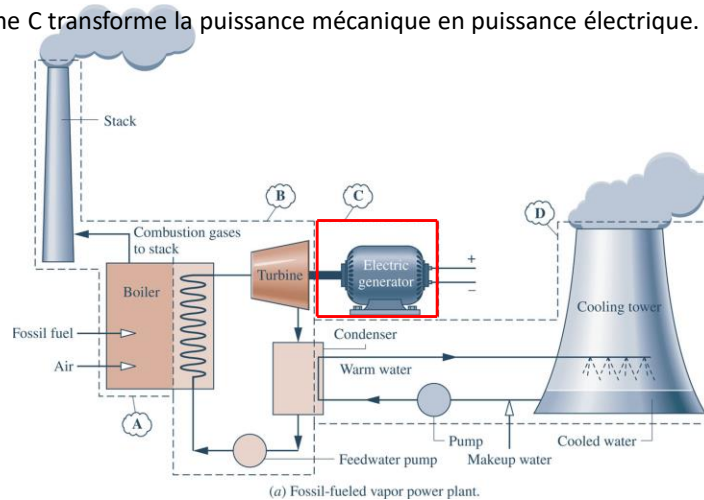
Prof. BOUTAMMACHTE

69

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Le système C transforme la puissance mécanique en puissance électrique.



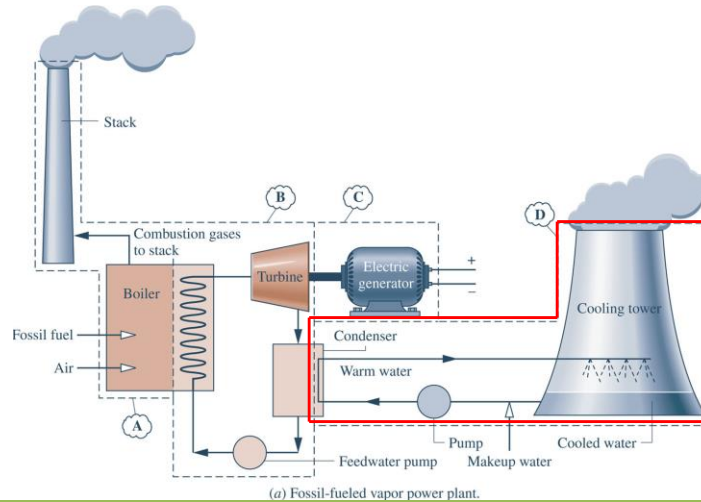
Prof. BOUTAMMACHTE

70

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Le système D sert à rejeter une quantité de chaleur au milieu extérieur (source froide).



Prof. BOUTAMMACHTE

71

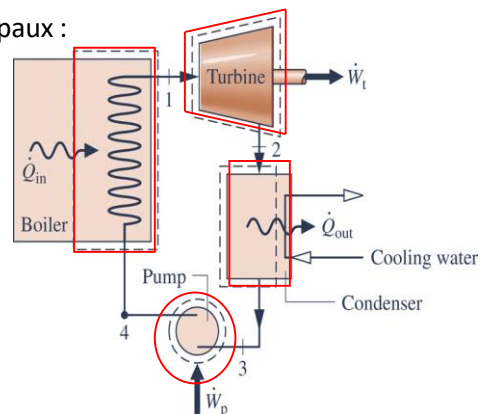
Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Chaque Kg d'eau décrit périodiquement un cycle thermodynamique. Ce dernier est appelé **cycle de RANKINE**.

Il existe 4 volumes de contrôle principaux :

- Turbine
- Condenseur
- Pompe
- Chaudière



Prof. BOUTAMMACHTE

72

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Les transformations constituant le cycle de RANKINE sont:

- **Transformation 1-2**: La vapeur est **détendue** dans la turbine en développant une puissance mécanique;
- **Transformation 2-3**: La vapeur est **condensée** dans le condenseur en cédant une puissance calorifique à la source froide;
- **Transformation 3-4**: Le liquide est **pompé** vers la chaudière;
- **Transformation 4-1**: Le liquide est **chauffé** et **évaporé** dans la chaudière.

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Hypothèses de calcul:

- ▶ Chaque élément est analysé comme un volume de contrôle au régime permanent;
- ▶ La turbine et la pompe fonctionnent adiabatiquement;
- ▶ Les variations de l'énergie cinétique et potentielle sont négligeables;
- ▶ Les pertes de charge dans le condenseur et la chaudière sont négligeables (la pression dans ces deux éléments est supposée constante).

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Bilan d'énergie

En appliquant le premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert, en régime permanent sur chaque élément, on trouve:

Turbines

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_2 - h_1$$

Condenseur

$$\frac{\dot{Q}_F}{\dot{m}} = h_3 - h_2$$

Pompe

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3$$

Chaudière

$$\frac{\dot{Q}_C}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

Prof. BOUTAMMACHTE

75

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Calcul de performance

Rendement thermodynamique:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{cycle}}}{\dot{Q}_C} = \frac{/\dot{W}_t / \dot{m} / - \dot{W}_p / \dot{m}}{\dot{Q}_C / \dot{m}} = \frac{/(h_2 - h_1) / - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

Le rapport entre les puissances échangées par la turbine et la pompe

$$\frac{\dot{W}_p / \dot{m}}{/\dot{W}_t / \dot{m} /} = \frac{(h_4 - h_3)}{/(h_2 - h_1) /}$$

La puissance fournie par la pompe est **négligeable** devant celle développée par la turbine (de l'ordre de **1%** de la puissance de la turbine).

Prof. BOUTAMMACHTE

76

Chapitre 3: Cycles à vapeur

2. Principe de fonctionnement

Le travail de la pompe

Le travail de la pompe est donné par la formule:

$$\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} \right)_s \approx v_3(p_4 - p_3)$$

- v_3 est le volume spécifique du liquide traversant la pompe.

Prof. BOUTAMMACHTE

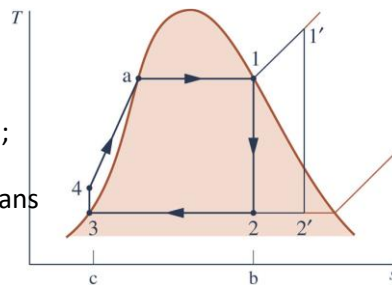
77

Chapitre 3: Cycles à vapeur

3. Cycle de RANKINE

Le cycle idéal de RANKINE est composé de:

- 1-2 : Détente isentropique (adiabatique réversible) à travers la turbine;
- 2-3: Condensation de la vapeur;
- 3-4: Pompage isentropique dans le pompe;
- 4-1: Chauffage puis vaporisation de l'eau dans la chaudière.



Prof. BOUTAMMACHTE

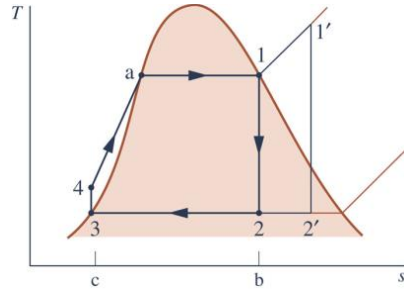
78

Chapitre 3: Cycles à vapeur

3. Cycle idéal de RANKINE

Il existe un **problème technique** au niveau de ce cycle:

- A la sortie de la turbine (point 2), et après la détente, la vapeur contient une partie d'**eau** sous forme **liquide**.
- **Ce mélange diphasique attaque les aubes de la turbine.**
 - Pour **éviter** ce problème, la vapeur saturée (point 1) est **surchauffée** jusqu'au point **1'** (**cycle de Hirn**). Dans ce cas, et après la détente, la vapeur contient moins d'eau liquide (**vapeur de meilleure qualité**).



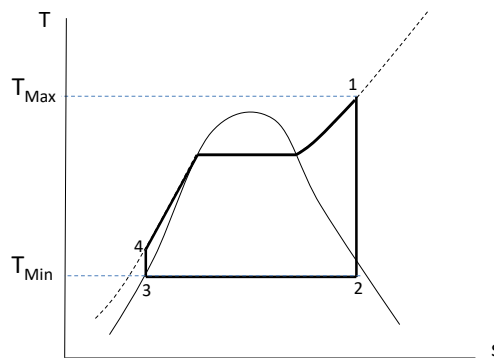
Prof. BOUTAMMACHTE

79

Chapitre 3: Cycles à vapeur

4. Cycle Hirn (Rankine avec surchauffe)

Le cycle idéal de Hirn a donc la forme suivante:



Le rendement thermodynamique du cycle est quasiment proportionnel $1 - \frac{T_{moy,Min}}{T_{moy,Max}}$ à:

- **Afin d'améliorer le rendement du cycle, il faut augmenter la température moyenne maximale et diminuer la température minimale du cycle.**

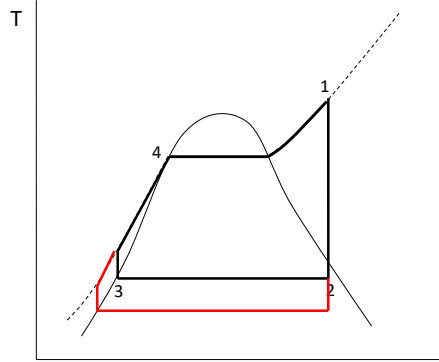
Prof. BOUTAMMACHTE

80

Chapitre 3: Cycles à vapeur

5. Cycle de Hirn modifié

- Diminuer la pression de condensation (pour diminuer T minimale);



Prof. BOUTAMMACHTE

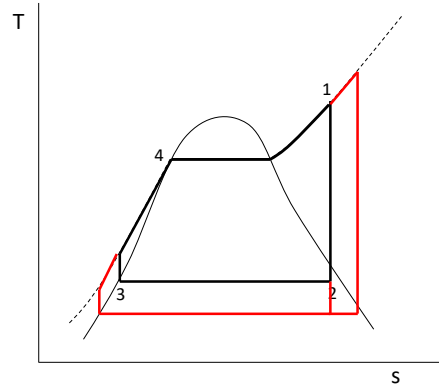
81

Chapitre 3: Cycles à vapeur

4. Cycle de Hirn modifié

- Augmenter la température de la surchauffe (pour augmenter T maximale);

Cette augmentation de la température est limitée (dans des cas à 620°C) pour des raisons métallurgiques.



Prof. BOUTAMMACHTE

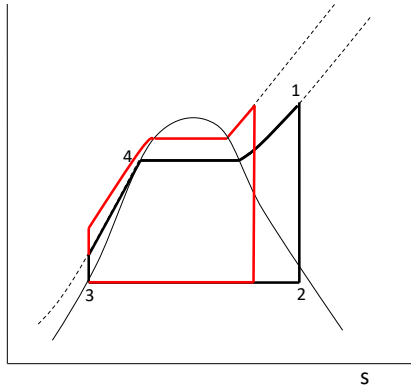
82

Chapitre 3: Cycles à vapeur

4. Cycle de Hirn modifié

- Augmenter la pression dans la chaudière (pour augmenter T maximale).

Cette augmentation de la température est limitée pour des raisons de résistance des matériaux de la chaudière. En plus, la qualité de la vapeur à la sortie de la turbine diminue. T



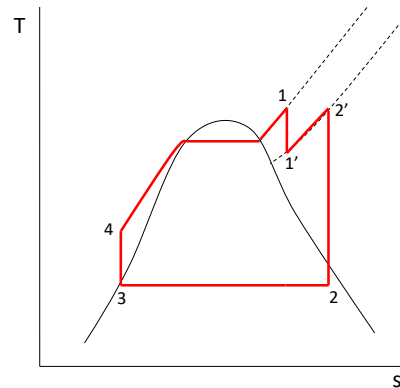
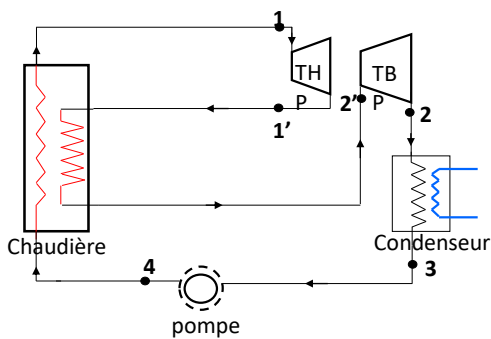
Prof. BOUTAMMACHTE

83

Chapitre 3: Cycles à vapeur

5. Cycle de Hirn avec re-surchauffe

- On effectue une première détente dans une turbine haute pression, puis une resurchauffe avant de faire une deuxième détente.



Prof. BOUTAMMACHTE

84

Chapitre 3: Cycles à vapeur

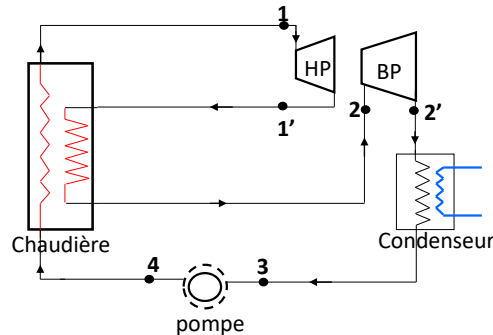
4. Cycle de Hirn avec re-surchauffe

La puissance calorifique par unité du débit, reçue par la fluide, de la source chaude (chaudière) est:

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}} = (h_1 - h_4) + (h_2 - h_{1'})$$

- La puissance mécanique développée par la fluide est:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = (h_1 - h_{1'}) + (h_2 - h_2')$$



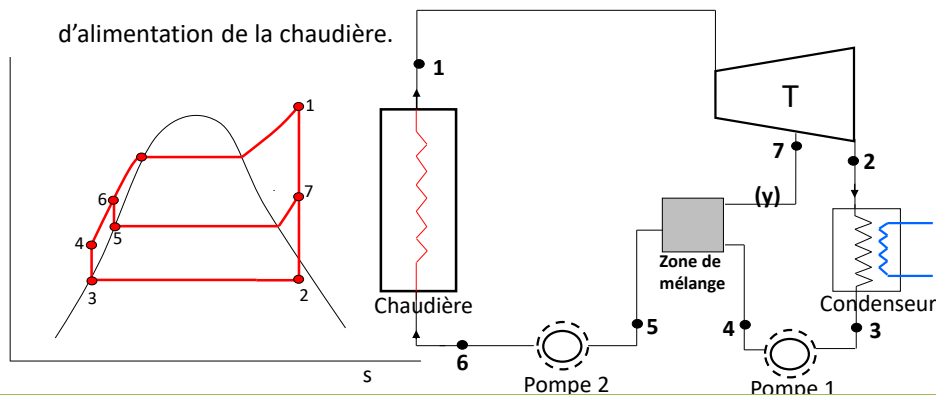
Prof. BOUTAMMACHTE

85

Chapitre 3: Cycles à vapeur

5. Cycle de Hirn avec soutirage (mélange direct)

- Parmi les méthodes permettant l'amélioration du rendement du cycle, on cite le **soutirage**.
- C'est une opération qui consiste à soutirer une quantité de vapeur à un certain étage de la turbine et la mélanger avec l'eau provenant de la pompe d'alimentation de la chaudière.



Chapitre 3: Cycles à vapeur

4. Cycle de Hirn avec soutirage

La chaleur fournie par la chaudière (par unité de masse):

$$\frac{\dot{Q}_C}{\dot{m}} = (h_1 - h_6)$$

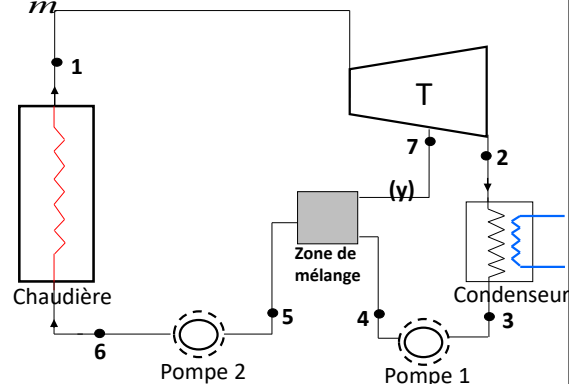
La chaleur cédée à la source froide est:

$$\frac{\dot{Q}_F}{\dot{m}} = (1 - y)(h_3 - h_2)$$

Puissance mécanique développée:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = (h_7 - h_1) + (1 - y)(h_2 - h_7)$$

Avec: $y = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}}$



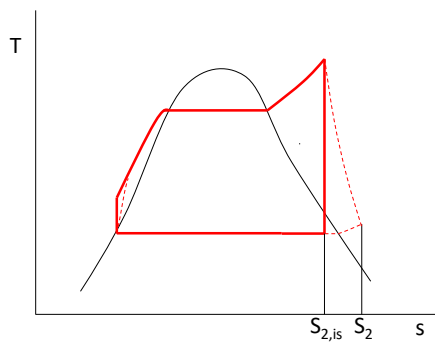
Prof. BOUTAMMACHTE

87

Chapitre 3: Cycles à vapeur

6. Rendement isentropique

Nous avons toujours considéré, jusqu'à maintenant, que la détente dans les turbines et la compression dans les pompes sont des processus isentropiques (adiabatiques réversibles). En réalité, les transformations dans ces machines ne sont pas réversibles et on assiste toujours à des pertes thermiques (transformation non adiabatique).



Prof. BOUTAMMACHTE

88

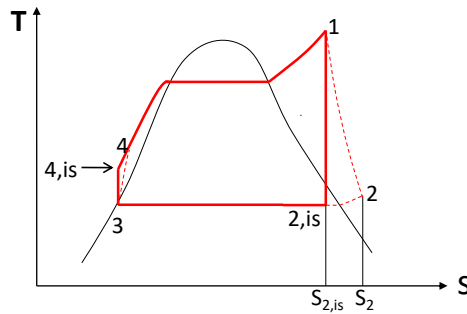
Chapitre 3: Cycles à vapeur

- Rendement isentropique pour les turbines

$$\eta_{is} = \frac{\text{Travail développé dans le cas réel}}{\text{Travail développé dans le cas idéal}} = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{is}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2,is} - h_1}$$

- Rendement isentropique pour la pompe:

$$\eta_{is} = \frac{\text{Travail reçu dans le cas idéal}}{\text{Travail reçu dans le cas réel}} = \frac{\dot{W}_{is}}{\dot{W}} = \frac{h_{4,is} - h_3}{h_4 - h_3}$$



89