

Chapitre III

Cycles de puissance



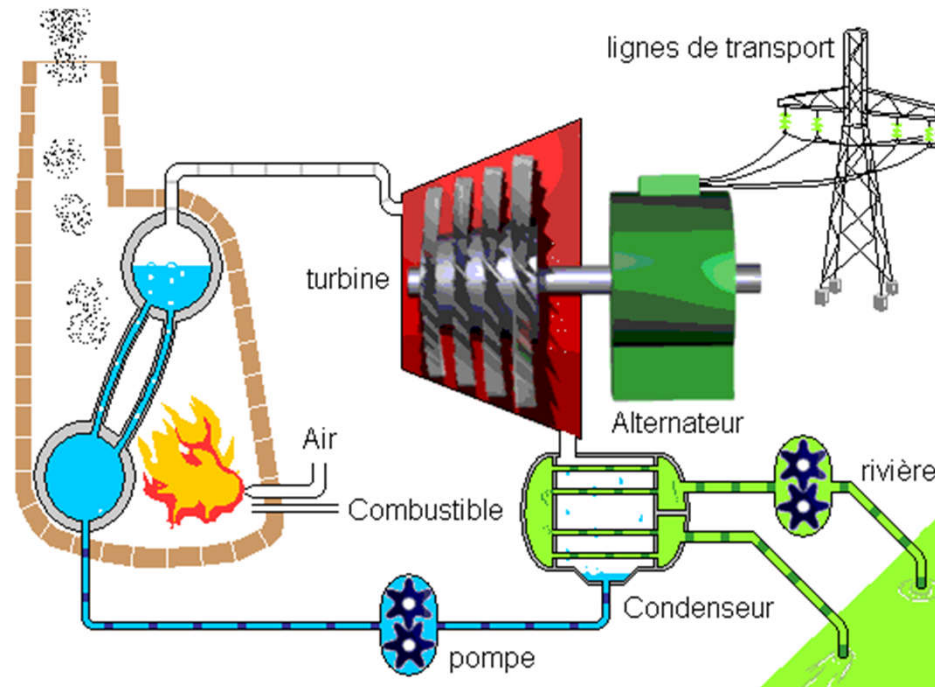
**Ce support de cours est en sa 1ère version
toute suggestion ou avis de la part des lecteurs
(en particulier des étudiants) est la bienvenue**

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

Introduction

Une centrale thermique sert à transformer l'énergie thermique (ou chaleur) en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique.



I- Fonctionnement d'une centrale thermique

Introduction

Une centrale thermique élémentaire est composée de:

- Chaudière ou générateur de vapeur,
- Turbine,
- Condenseur
- Pompe.

Un fluide, dit fluide de travail, circule entre ces différents éléments.

Généralement une centrale thermique fonctionne avec la vapeur d'eau.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

Introduction

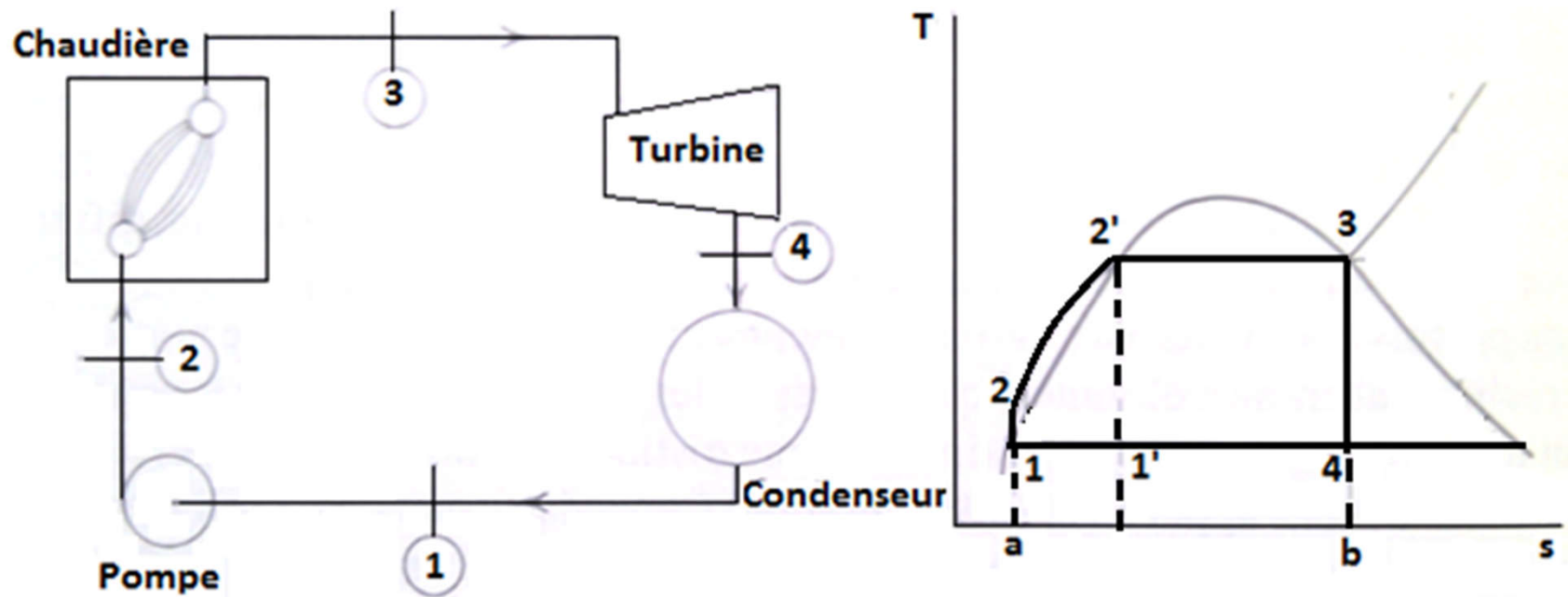
- À la sortie de la chaudière, la vapeur qui est à haute pression (*HP*) pénètre dans la turbine où elle subit une détente jusqu'à une basse pression (*BP*).
- Cette détente produit du travail mécanique qui est récupérée par une génératrice qui le transforme en électricité (la génératrice n'est pas montrée sur le schéma).

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

Introduction

- La vapeur détendue quitte la turbine. Elle est récupérée par un condenseur où elle est refroidie par un courant d'eau de refroidissement.
- À la sortie du condenseur, la vapeur d'eau qui est complètement transformée en liquide, est pompée vers la chaudière pour reprendre le cycle.
- Le cycle idéal d'une centrale thermique est le cycle de *Rankine*. Ce cycle est représenté dans un diagramme $T-s$.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique



I- Fonctionnement d'une centrale thermique

1- Cycle de Rankine

Le cycle de *Rankine* est composé des transformations suivantes:

Compression isentropique 1-2 :

l'eau sous forme liquide est comprimée dans la pompe pour élever sa pression de *BP* à *HP*. Idéalement cette transformation est adiabatique et réversible, donc isentropique.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

1- Cycle de Rankine

Chauffage isobare 2-3 :

l'eau liquide qui est à haute pression est chauffée dans la chaudière à haute température. Ce chauffage est idéalement isobare réversible. Au cours de ce chauffage l'eau liquide subit un changement de phase liquide-vapeur (transformation 2'-3). A la sortie de la chaudière l'eau est sous forme de la vapeur saturée.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

1- Cycle de Rankine

Détente isentropique 3-4 :

La vapeur d'eau est détendue dans la turbine de *HP* à *BP*. Cette détente est réversible et adiabatique, donc isentropique. Cette détente produit du travail mécanique. Cette transformation constitue la phase motrice du cycle.

Condensation isobare 4-1:

La vapeur d'eau est ensuite envoyée dans un condenseur où elle va subir un changement de phase vapeur-liquide. Idéalement cette condensation est isobare réversible.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

1- Cycle de Rankine

Remarquons que la vapeur d'eau dans le cycle de Rankine évolue entre deux températures extrêmes $T_{max}=T_3=T_2'$ et $T_{min}=T_4=T_1$.

Nous savons d'après le second principe de la thermodynamique, que le cycle qui a le rendement maximum entre deux températures données est le cycle de Carnot. Ce cycle est représenté sur le diagramme $T-s$. Soit le cycle $1'-2'-3-4$. on peut alors se demander pourquoi on ne fait pas fonctionner la centrale thermique selon ce cycle de Carnot.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

1- Cycle de Rankine

En fait ce cycle présente un gros inconvénient qui le rend pas pratique. En effet, pour que la centrale thermique fonctionne selon le cycle de Carnot, il faudrait que la pompe fonctionne selon la transformation 1'-2'. Ce qui signifie qu'elle doit pomper un mélange 'liquide + vapeur' (état 1').

Or l'expérience montre qu'il est très difficile de construire une pompe qui pompe le mélange à l'état 1'.

I- Fonctionnement d'une centrale thermique

Introduction

En pratique il est plus facile de pomper du liquide, ce qui est obtenu en condensant toute la vapeur contenue dans le mélange $1'$ avant de réaliser l'opération de pompage. Ceci est exactement ce qui est fait dans le cycle de Rankine. Ce cycle est le cycle idéal le plus proche du fonctionnement réel d'une centrale thermique élémentaire.

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

Introduction

Le cycle de Rankine est un système fermé. En effet la masse d'eau circulant dans le cycle est constante. Le débit massique de cette eau dans les différentes machines (pompe, chaudière, turbine, condenseur) est donc constant en régime permanent. Soit ce débit \dot{m} .

L'analyse thermodynamique du cycle de Rankine se fait par l'application des bilans de masse, d'énergie et d'entropie aux différentes machines thermiques constituant ce cycle. Ces machines sont des systèmes thermodynamiques ouverts.

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

1- Introduction

Nous allons considérer chaque machine et lui appliquer les bilans établis dans le chapitre précédent, en régime permanent.

Comme il a été montré dans le chapitre précédent les variations des énergies cinétique et potentielle peuvent être négligés pour les machines constituant le cycle de Rankine.

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

2-a- Pompe

Soit \dot{W}_P le travail reçu par l'eau dans la pompe. La transformation 1-2 que subit l'eau dans la pompe est supposée isentropique, les bilans d'énergie et d'entropie s'écrivent :

$$h_2 - h_1 = \frac{\dot{W}_P}{\dot{m}} \quad s_2 = s_1$$

Notons que le travail de la pompe peut aussi se calculer par l'expression du travail réversible issue du principe fondamental de la thermodynamique :

$$w_{\text{Prév}} = \int_1^2 v dp \approx v_f(T_1) \cdot (p_2 - p_1)$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

2- b- Chaudière

Soit \dot{Q}_{in} la chaleur reçue par l'eau dans la chaudière au cours de la transformation 2-3. Les bilans d'énergie et d'entropie sont ainsi:

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

$$s_3 - s_2 = \int_2^3 \frac{\delta q_{in}}{T}$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

2- c- Turbine

Soit \dot{W}_T le travail cédé par la vapeur d'eau dans la turbine.
La transformation 3-4 que subit la vapeur d'eau dans la turbine est supposée isentropique, les bilans d'énergie et d'entropie s'écrivent :

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

$$s_4 = s_3$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

2- d- Condenseur

Le condenseur est un échangeur sans contact direct. La vapeur d'eau ne se mélange pas avec l'eau de refroidissement. On peut donc appliquer les bilans à un volume de contrôle qui englobe uniquement le circuit de la vapeur d'eau dans le condenseur. Soit \dot{Q}_{out} la chaleur perdue par la vapeur d'eau dans le condenseur au cours de la transformation 4-1. Les bilans d'énergie et d'entropie s'écrivent :

$$h_1 - h_4 = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} \quad s_1 - s_4 = \int_4^1 \frac{\delta q_{out}}{T}$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

3- Rendement thermodynamique

Notons que :

$\dot{W}_P > 0$ (travail reçu), $\dot{W}_T < 0$ (travail cédé),

$\dot{Q}_{in} > 0$ (chaleur reçue) et $\dot{Q}_{out} < 0$ (chaleur perdue).

Le cycle de Rankine est un cycle moteur. Son rendement thermodynamique est:

$$\eta_{Rankine} = -\frac{\dot{W}_{cycle}}{\dot{Q}_{reçue}}$$

Le travail du cycle est la somme de tous les travaux des différentes transformations du cycle, soit :

$$\dot{W}_{cycle} = \dot{W}_P + \dot{W}_T$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

3- Rendement thermodynamique

La chaleur reçue par le cycle est la chaleur reçue par l'eau au niveau de la chaudière, soit :

$$\dot{Q}_{re\grave{c}ue} = \dot{Q}_{in}$$

Le rendement thermodynamique du cycle de Rankine élémentaire s'écrit donc:

$$\eta_{Rankine} = -\frac{\dot{W}_P + \dot{W}_T}{\dot{Q}_{in}}$$

Le cycle de Rankine est un système fermé, on peut donc lui appliquer le 1^{er} principe de la thermodynamique, soit :

$$\dot{W}_P + \dot{W}_T + \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} = 0.$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

3- Rendement thermodynamique

On en déduit que :

$$\eta_{Rankine} = \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$

En déduisant les chaleurs échangées des bilans d'énergie ci-dessus, on obtient l'expression du rendement thermodynamique en fonction des enthalpies:

$$\eta_{Rankine} = 1 + \frac{h_1 - h_4}{h_3 - h_2}$$

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

4- Interprétation géométrique du rendement

À partir des bilans d'entropie de la chaudière et du condenseur, on déduit:

$$q_{in} = \int_2^3 T ds \text{ et } q_{out} = \int_4^1 T ds$$

Dans le diagramme $T-s$, ces deux intégrales peuvent être interprétées comme la surface sous les courbes représentant respectivement les transformations 2-3 et 4-1. En se reportant au diagramme $T-s$ de la figure 1, on peut donc affirmer que q_{in} est la surface du polygone $a-2-2'-3-b$ et que q_{out} est la surface du rectangle $a-1-4-b$.

II- Analyse thermodynamique du cycle de Rankine

4- Interprétation géométrique du rendement

En tenant compte des signes de ces chaleurs, on peut écrire:

$$q_{in} = \text{surface}(a-2-2'-3-b) \text{ et } q_{out} = -\text{surface}(a-1-4-b).$$

On en déduit le travail du cycle par unité de masse :

$$\begin{aligned} w_{cycle} &= -(q_{in} + q_{out}) = -\text{surface}(1-2-2'-3-4-1) \\ &= -\text{surface du cycle}. \end{aligned}$$

Le rendement du cycle de Rankine élémentaire peut donc être interprété géométriquement comme le rapport de la surface du cycle à la surface du polygone $(a-2-2'-3-b)$,

soit :

$$\eta_{Rankine} = \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{q_{in} + q_{out}}{q_{in}} = \frac{\text{surface du cycle}(1-2-3-4)}{\text{surface}(a-2-2'-3-b)}$$

III- Effets des HP et BP sur le cycle de Rankine

III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine

1- Introduction

Le rendement thermodynamique du cycle de Carnot moteur augmente si on augmente la température maximale du cycle T_C ou si on diminue la température minimale du cycle T_F .

Dans le cas du cycle de Rankine élémentaire, on peut considérer que ce cycle évolue entre 2 sources de chaleur : la source chaude est la chaudière et la source froide est le condenseur.

L'effet des températures de ces 2 sources sur le rendement du cycle sera étudié dans cette section.

III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine

1- Introduction

Dans un cycle de Rankine élémentaire la température maximale T_{max} du cycle correspond à la température de sortie de la chaudière.

Le fluide de travail étant saturé à cette sortie, sa pression est fixe et égale à la pression de saturation de T_{max} .

Etudier l'effet de T_{max} revient donc à étudier l'effet de cette pression, qui est la pression *HP*.

III- Effets des HP et BP sur le cycle de Rankine

1- Introduction

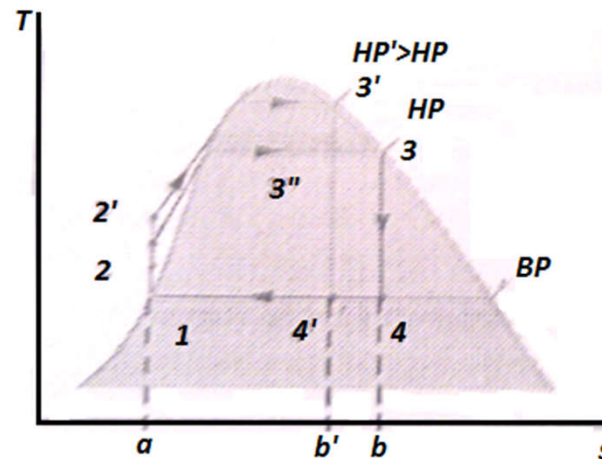
On peut dire de même pour T_{min} , qui est la température dans le condenseur où le fluide de travail est à l'état saturé et donc sa pression est fixe et égale à la pression de saturation de T_{min} ou encore BP .

On va donc étudier l'effet de ces pressions HP et BP sur le cycle de Rankine et montrer que leur effet est identique à celui de T_{min} et T_{max} sur le cycle de Carnot.

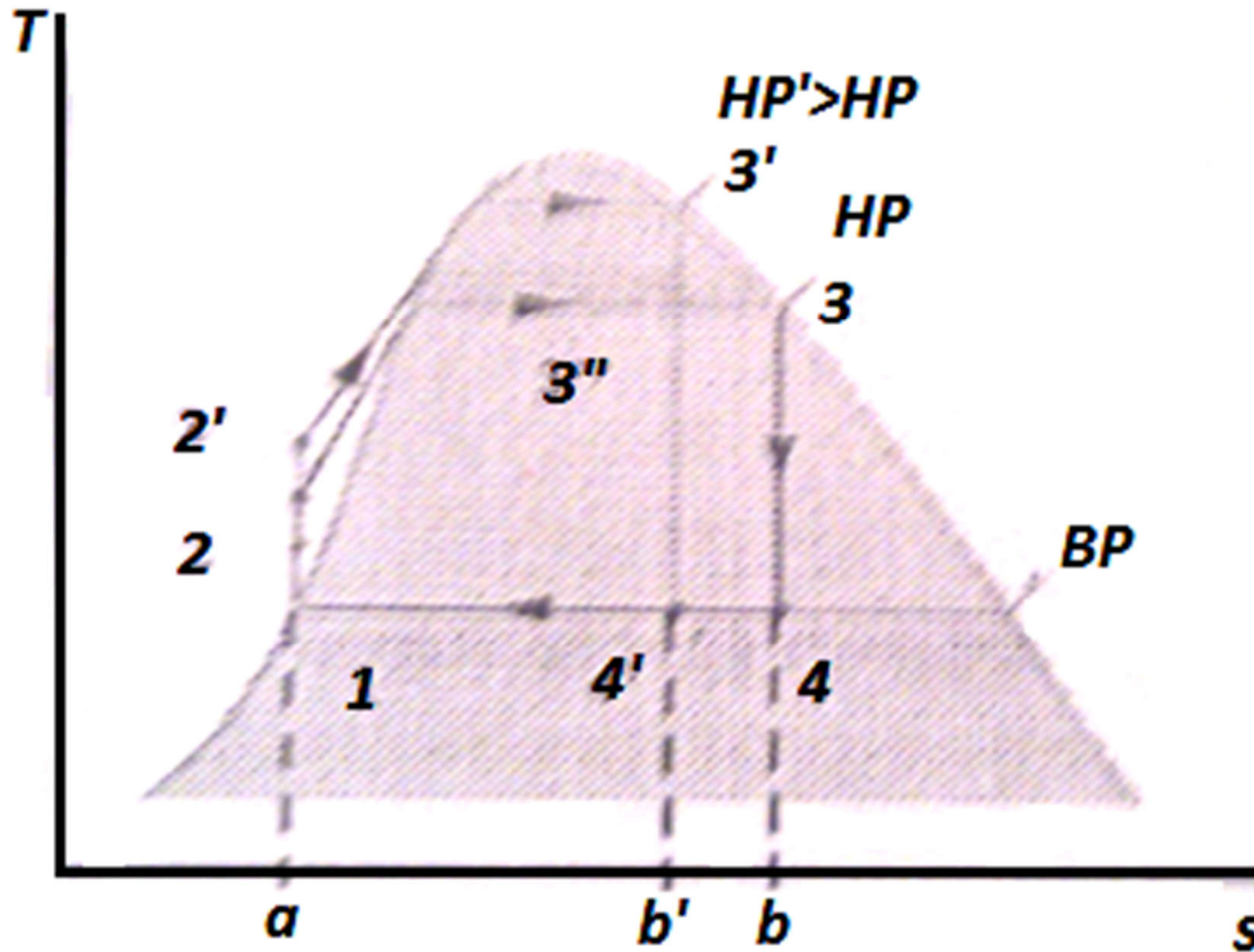
III- Effets des HP et BP sur le cycle de Rankine

2- Effet de HP

La figure ci-dessous représente 2 cycles de Rankine élémentaires qui ont la même pression BP mais 2 HP pressions différentes. Le cycle de référence est 1-2-3-4. En augmentant la pression dans la chaudière de HP à HP' on obtient le cycle 1-2'-3'-4'.



III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine



III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine

2- Effet de *HP*

En utilisant l'interprétation géométrique du cycle de Rankine établie ci-dessus, on constate qu'en passant du cycle avec *HP* au cycle avec *HP'* :

- Le travail du cycle, représenté par la surface du cycle, augmente de $2-2'-3'-3''-2$ et diminue de la surface $4-4'-3''-3-4$. Ces 2 surfaces sont pratiquement égales, ce qui fait que le travail du cycle ne change pratiquement pas en augmentant *HP*.

III- Effets des HP et BP sur le cycle de Rankine

2- Effet de HP

La chaleur reçue par le cycle au niveau de la chaudière augmente de la surface $2-2'-3'-3''-2$ et diminue de la surface $b'-3''-3-b-b'$.

Les surfaces $2-2'-3'-3''-2$ et $4-4'-3''-3-4$ sont pratiquement égales, on en déduit que la chaleur reçue par le cycle diminue de la surface $b'-4'-4-b-b'$.

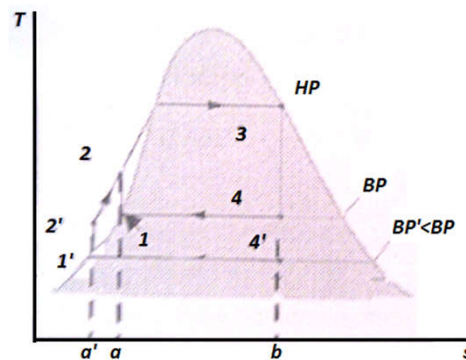
Il s'en suit que **le rendement du cycle de Rankine augmente en augmentant HP , la pression dans la chaudière.**

III- Effets des HP et BP sur le cycle de Rankine

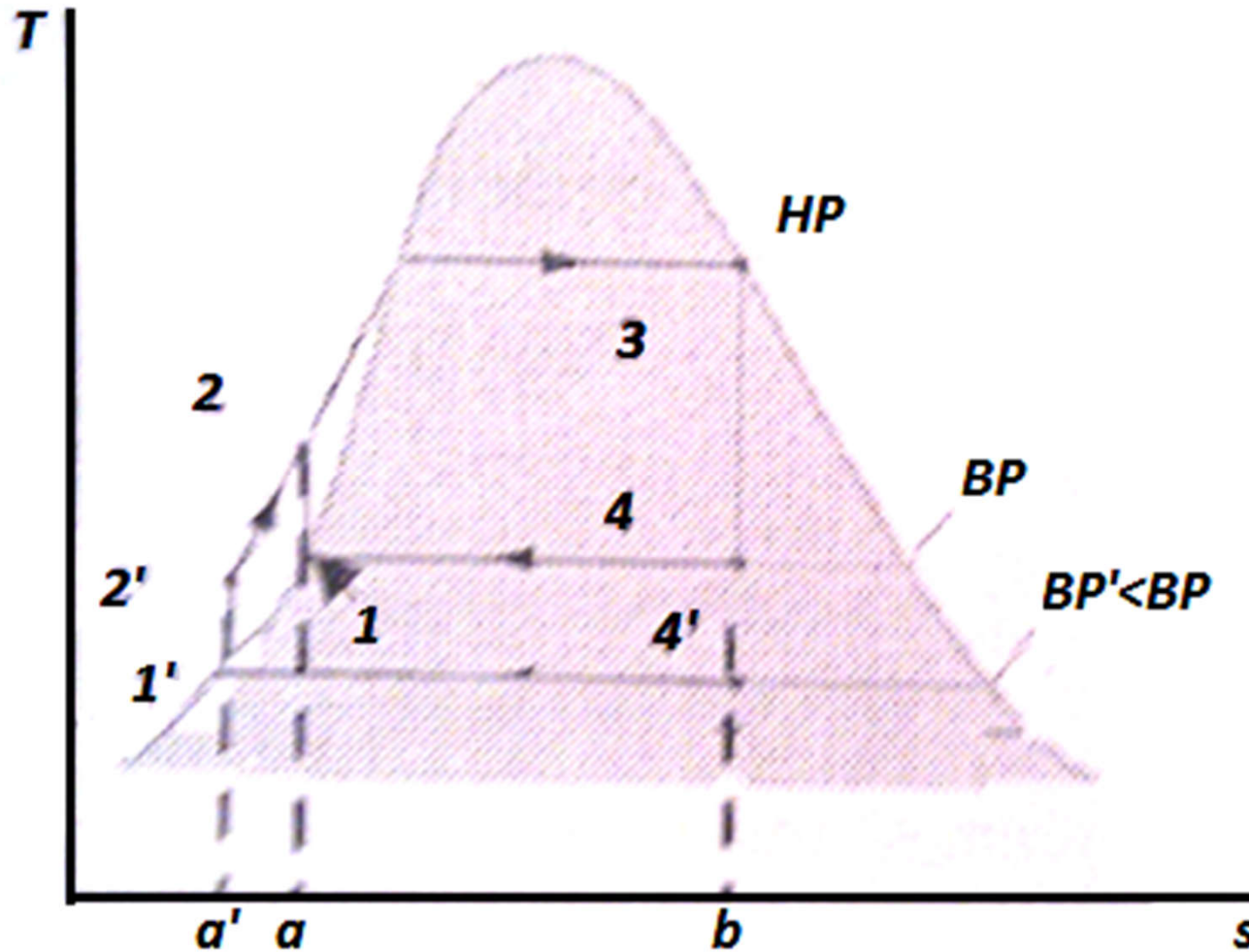
2- Effet de BP

La figure ci-dessous représente deux cycles de Rankine élémentaires qui ont la même pression HP mais 2 pressions BP différentes.

Le cycle de référence est 1-2-3-4. en diminuant la pression dans le condenseur de BP à BP' on obtient le cycle 1'-2'-3-4'.



III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine



III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine

2- Effet de *BP*

On constate qu'en passant du cycle avec *BP* au cycle avec *BP'*:

- Le travail du cycle, représenté par la surface du cycle, augmente de 4-4'-1'-2'-2-1-4;
- La chaleur reçue par le cycle au niveau de la chaudière augmente de la surface a-2-2'-a'-a.

Les surfaces avec lesquelles augmentent le travail et la chaleur reçue sont pratiquement égales.

Il s'ensuit que **le rendement du cycle de Rankine augmente en diminuant *BP*, la pression dans le condenseur.**

III- Effets des HP et BP sur le cycle de Rankine

3- Conclusion

- On retrouve les mêmes effets des températures T_{max} (ou encore HP) et T_{min} (ou encore BP) sur le cycle de Rankine que sur le cycle de Carnot.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

- En augmentant HP ou en diminuant BP , le point 4 (sortie de la turbine) s'éloigne de la courbe de vapeur saturée. Le titre x_4 en 4 diminue donc. Cette diminution du titre entraîne une augmentation de l'humidité (eau liquide) présente dans la turbine et par conséquent une diminution des performances et un danger de corrosion de celle-ci.

III- Effets des *HP* et *BP* sur le cycle de Rankine

3- Conclusion

Pour éviter ces problèmes, l'humidité (eau liquide) à la sortie de la turbine doit être inférieure à 10%, soit encore $X_4 > 90\%$. Ceci peut se faire par améliorations du cycle de Rankine.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

IV- Améliorations du cycle de Rankine

Introduction

Nous avons vu que pour avoir un bon rendement thermodynamique, un cycle de Rankine doit être construit avec HP la plus grande et BP la plus basse. Cependant le choix de ces HP et BP est limité par un facteur important : La valeur de HP et BP doivent être telles que l'humidité dans la turbine n'excède pas 10% pour éviter les problèmes de corrosion de la turbine et par conséquent la chute de son rendement. Le problème de l'humidité entraîné par l'augmentation de HP ou diminution de BP peut être résolu par des améliorations du cycle de Rankine

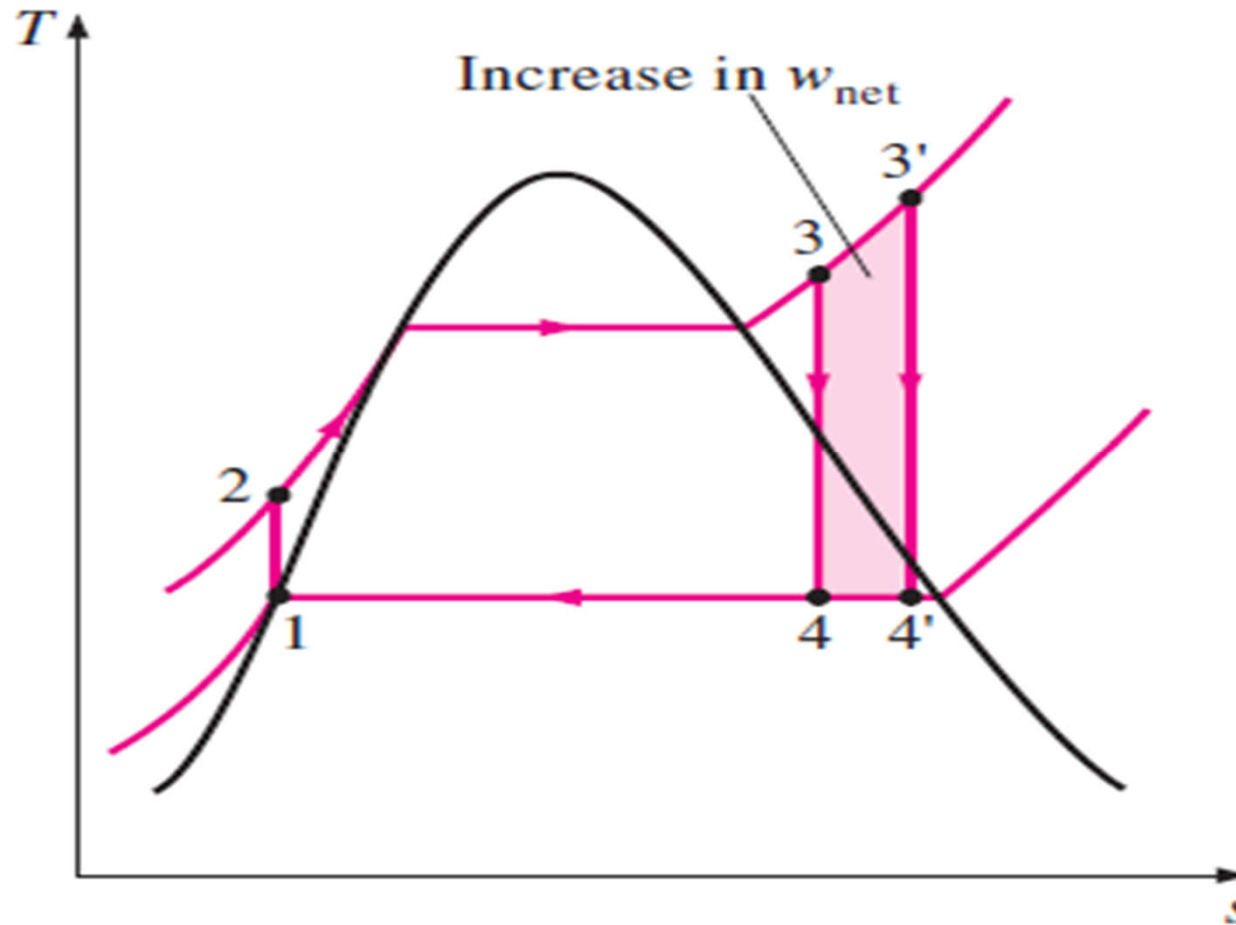
IV- Améliorations du cycle de Rankine

1- Cycle de Rankine à surchauffe

À la sortie de la chaudière l'eau est à l'état de vapeur saturée dans un cycle de Rankine élémentaire. Une amélioration de ce cycle consiste à fournir plus de chaleur dans la chaudière pour rendre la vapeur à l'état surchauffé. Ce cycle de Rankine à surchauffe est représenté sur le diagramme $T-s$ de la figure ci-dessous :

IV- Améliorations du cycle de Rankine

1- Cycle de Rankine à surchauffe



IV- Améliorations du cycle de Rankine

1- Cycle de Rankine à surchauffe

Le rendement du cycle de Rankine à surchauffe est légèrement supérieur à celui du cycle de Rankine élémentaire. En effet la température moyenne à laquelle la chaleur reçue par l'eau (*transformation 2-3*) est la plus grande dans le cas du cycle de Rankine à surchauffe.

L'amélioration la plus importante apportée par la surchauffe est l'augmentation du titre à la sortie de la turbine: $x_{4'} > x_4$. ceci fait diminuer l'humidité dans la turbine et donc améliore son rendement et lui évite la détérioration précoce par corrosion.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

1- Cycle de Rankine à surchauffe

La surchauffe est techniquement limitée par le point de fusion des matériaux du surchauffeur et de la turbine.

De nos jours la température maximale permise pour la surchauffe est de l'ordre de 600°C .

IV- Améliorations du cycle de Rankine

2- Cycle de Rankine à resurchauffe

La resurchauffe consiste à puiser la vapeur détendue dans la turbine jusqu'à une pression intermédiaire pour la réinjecter dans le générateur de vapeur afin de la surchauffer pour ensuite la remettre dans la turbine. La vapeur ainsi surchauffée finie sa détente dans la turbine. La turbine est ainsi divisée en 2 étages. Le 1^{er} est l'étage haute pression *HP* et le 2^{ème} est l'étage basse pression *BP*.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

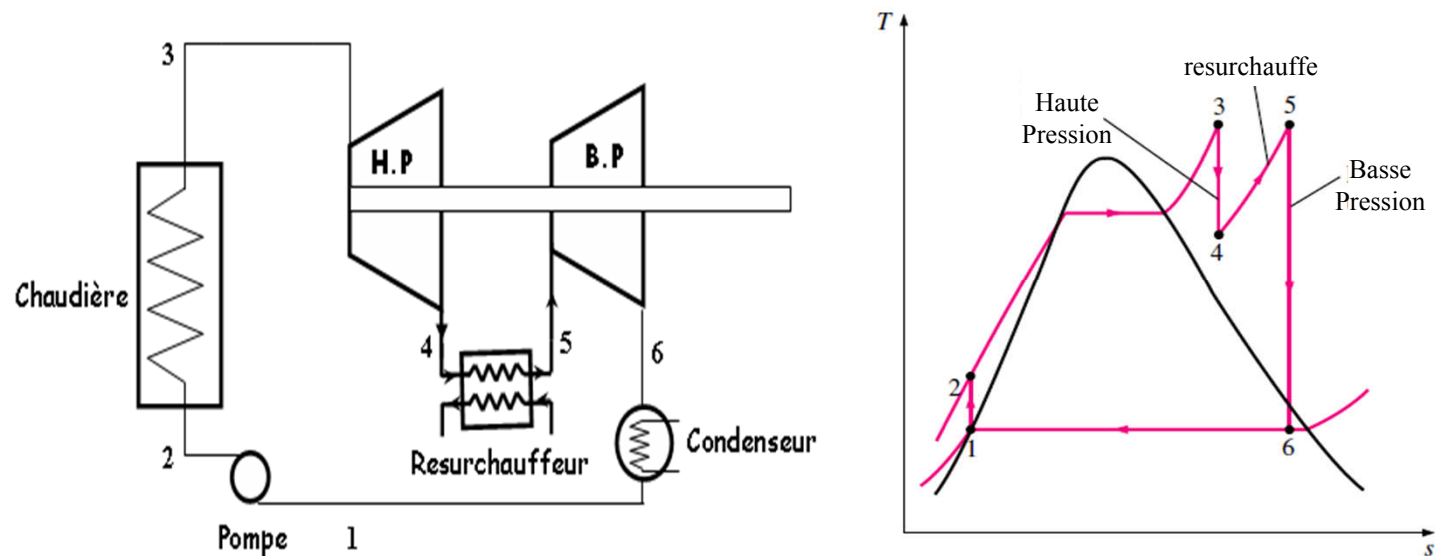
2- Cycle de Rankine à resurchauffe

Le 1^{er} est l'étage haute pression *HP* et le 2^{ème} est l'étage basse pression *BP*. La détente dans l'étage haute pression se fait de P_3 à la pression intermédiaire P_4 alors que la détente dans l'étage *BP* se fait de P_5 à P_6 . le cycle étant idéal, il n'y a pas de pertes de charge dans le surchauffeur, soit $P_5 = P_4$.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

2- Cycle de Rankine à resurchauffe

La détente dans l'étage haute pression se fait de P_3 à la pression intermédiaire P_4 alors que la détente dans l'étage BP se fait de P_5 à P_6 . le cycle étant idéal, il n'y a pas de pertes de charge dans le surchauffeur, soit $P_5 = P_4$.



IV- Améliorations du cycle de Rankine

2- Cycle de Rankine à resurchauffe

Analyse thermodynamique

Au cours du cycle à resurchauffe, l'eau reçoit de la chaleur dans la chaudière (évolution 2-3) et aussi dans le réchauffeur (évolution 4-5), soit donc :

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{2-3} + \dot{Q}_{4-5}$$

En écrivant le bilan d'énergie de la chaudière et du réchauffeur, on déduit :

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 + h_5 - h_4$$

IV- Améliorations du cycle de Rankine

2- Cycle de Rankine à resurchauffe

Le travail de la turbine est produit au cours des détentees dans les 2 étages *HP* et *BP*. Le travail de la turbine est :

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{3-4} + \dot{W}_{5-6}$$

En écrivant le bilan d'énergie des 2 étages de la turbine, on déduit :

$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_4 - h_3 + h_6 - h_5$$

Le rendement thermodynamique du cycle de Rankine à resurchauffe est alors :

$$\eta_{Rankine, resurchauffe} = -\frac{\dot{W}_P + \dot{W}_T}{\dot{Q}_{in}} = -\frac{h_2 - h_1 + h_4 - h_3 + h_6 - h_5}{h_3 - h_2 + h_5 - h_4}$$

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Le cycle à régénération constitue une amélioration du cycle de Rankine élémentaire par l'introduction du préchauffage de l'eau d'alimentation de la chaudière. Dans ce cycle, l'eau d'alimentation est préchauffée en le faisant passer autour du bâti de la turbine dans le sens contraire au sens de la vapeur. Ainsi une partie de la chaleur de la vapeur d'eau se détendant dans la turbine est absorbée par l'eau d'alimentation.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Ce cycle à régénération (cycle qui produit un rendement maximum pour une centrale thermique) est difficile à réaliser dans la pratique suite aux raisons suivantes :

- Le préchauffage de l'eau alimentaire à travers le bâti de la turbine est très difficile à réaliser dans la pratique;
- La chaleur cédée par la vapeur d'eau dans la turbine à l'eau alimentaire augmente fortement la teneur en eau liquide dans la turbine ($x_4 < 90\%$ endommagement de la turbine par corrosion).

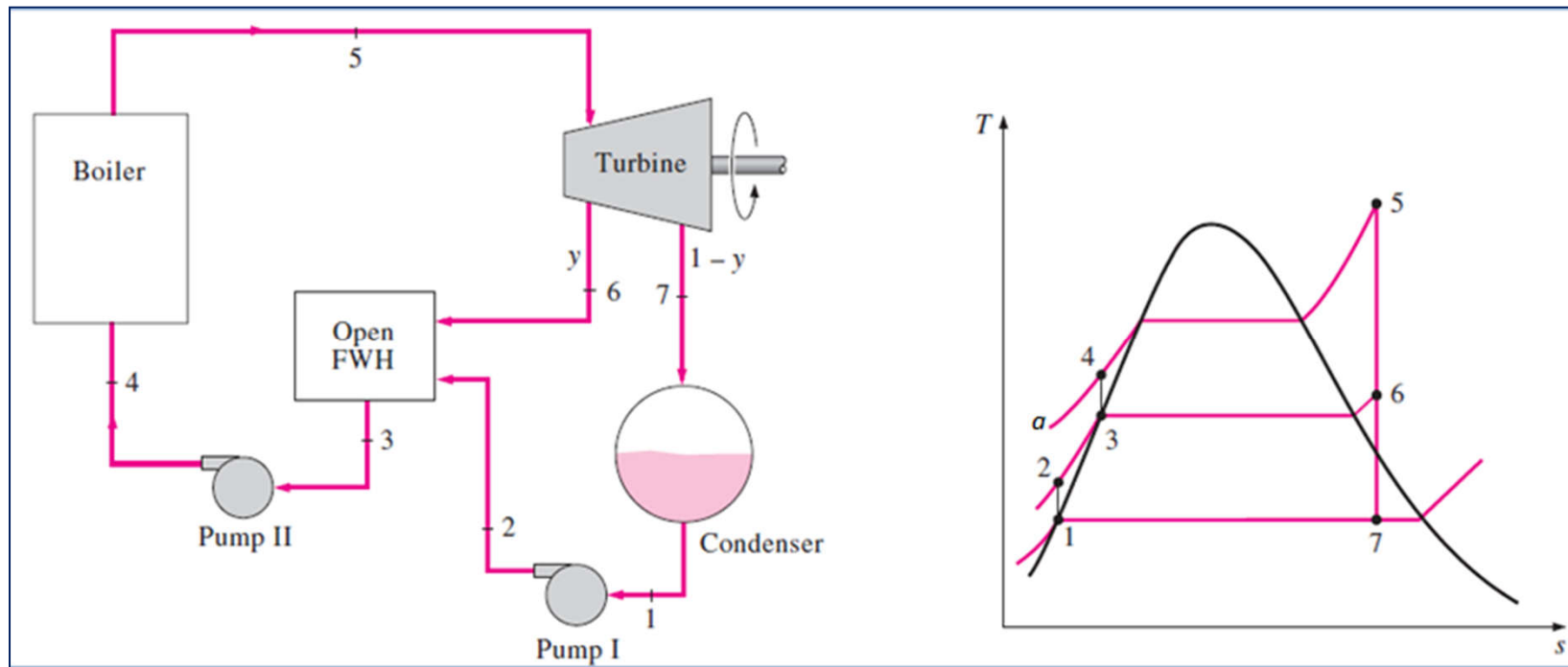
IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Dans la pratique le préchauffage de l'eau est réalisé par l'extraction d'une partie de la vapeur d'eau de la turbine à une température moyenne. Cette vapeur extraite ou soutirée est alors mélangée avec l'eau alimentaire afin d'en augmenter la température. On obtient alors le cycle de Rankine à soutirage représenté sur la figure ci dessous :

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage



IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Dans le cycle de Rankine à soutirage, la vapeur d'eau issue de la chaudière (état 5) entre dans la turbine où elle est détendue jusqu'à une pression intermédiaire dite pression de soutirage P_6 (état 6). Une partie de la vapeur est alors extraite (on dit aussi soutirée, d'où le nom du cycle) et envoyée dans un réchauffeur R . Soit y la fraction de débit soutirée de la turbine. La vapeur restante continue sa détente jusqu'à la basse pression BP , soit P_7 ici. Cette vapeur est ensuite condensée dans le condenseur.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Le condensat est alors pompé jusqu'à la pression intermédiaire de soutirage P_6 . Ce condensat est envoyé dans le réchauffeur R où il va se mélanger avec la vapeur soutirée. La fraction de vapeur soutirée y est calculée de telle façon à ce que l'état du mélange à la sortie du réchauffeur soit du liquide saturé (état 3). Le mélange issu du réchauffeur est pompé jusqu'à la haute pression P_4 et ensuite envoyé dans la chaudière.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

La turbine d'un cycle à soutirage est divisée en 2 parties, on parle d'étages. Le 1^{er} est l'étage haute pression (processus 5-6) et le 2^{ème} est l'étage BP (processus 6-7).

En considérant le cycle de Rankine à soutirage représenté sur le diagramme $T-s$ figure précédente, on constate que la chaleur est fournie dans la chaudière entre les états 4 et 5. Par rapport au cycle de Rankine élémentaire (1-2-a-4-5-7) la chaleur fournie au niveau de la chaudière pour un cycle à soutirage est nettement plus faible, il s'ensuit que le rendement de ce cycle est plus important.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Par ailleurs la technique de soutirage permet de diminuer le risque de corrosion dans la turbine .Ce risque est encore plus faible avec le couplage du soutirage et de la surchauffe.

Le réchauffeur utilisé dans le cycle de la figure 6 est un réchauffeur à mélange. Dans ce type de réchauffeur, la vapeur soutirée est mélangée avec le condensa. Les 2 fluides sont donc à la même pression, soit la pression de soutirage, d'où la nécessité d' une 2^{ème} pompe pour ramener le mélange à la pression *HP*.

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Dans un même cycle plusieurs soutirages peuvent être utilisés. Ceci permet d'effectuer de faibles extractions de vapeur à chaque soutirage afin d'augmenter la température moyenne d'addition de la chaleur dans la chaudière.

Dans la pratique on n'utilise pas plus de 5 soutirages, pour des raisons économique (coût du matériel comparé au profit tiré du soutirage).

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Analyse thermodynamique

Une étape importante de l'analyse d'un cycle à soutirage est la détermination du débit de soutirage. Considérons le volume de contrôle entourant tous les étages de la turbine. Ce volume de contrôle possède une entrée et 2 sorties.

Le bilan de masse de ce volume de contrôle s'écrit:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_7$$

En divisant cette équation par le débit de la vapeur dans la chaudière, \dot{m}_5 , on obtient:

$$1 = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5} + \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_5}$$

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Or la fraction de vapeur soutirée est : $y = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5}$, soit : $\frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_5} = 1 - y$

La fraction de débit soutiré est déterminée par l'application du bilan d'énergie du réchauffeur, soit :

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_6 h_6$$

Or $\dot{m}_3 = \dot{m}_5$ et $\dot{m}_2 = \dot{m}_7$

En divisant l'équation du bilan d'énergie par \dot{m}_5 on obtient la fraction de débit soutiré :

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2}$$

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Le travail de la turbine est la somme des travaux des 2 étages, soit:

$$w_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_5} = (h_6 - h_5) + (1 - y)(h_7 - h_6)$$

Le travail des pompes est la somme des travaux des 2 pompes, soit :

$$w_P = \frac{\dot{W}_P}{\dot{m}_5} = (h_4 - h_3) + (1 - y)(h_2 - h_1)$$

La chaleur reçue par la vapeur dans la chaudière est :

$$q_{in} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}_5} = (h_5 - h_4)$$

IV- Améliorations du cycle de Rankine

3- Cycle de Rankine à régénération et soutirage

Le rendement du cycle de Rankine à soutirage est :

$$\eta_{Rankine, \text{soutirage}} = \frac{w_T + w_P}{q_{in}} = \frac{(h_6 - h_5) + (h_4 - h_3) + (1 - y)[(h_2 - h_1) + (h_7 - h_6)]}{(h_5 - h_4)}$$

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

Le cycle de fonctionnement d'une centrale thermique réelle n'est pas exactement un cycle de Rankine tel qu'il a été étudié ci-dessus.

En effet, dans un cycle réel il y a des pertes d'énergie dues aux plusieurs facteurs entraînant des irréversibilités (friction, perte de chaleur....). Ces irréversibilités ont lieu dans les 4 éléments d'une centrale thermique : la chaudière, la turbine, la pompe et le condenseur, en plus de la tuyère qui relie ces éléments.

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

1- Irréversibilités dans la turbine

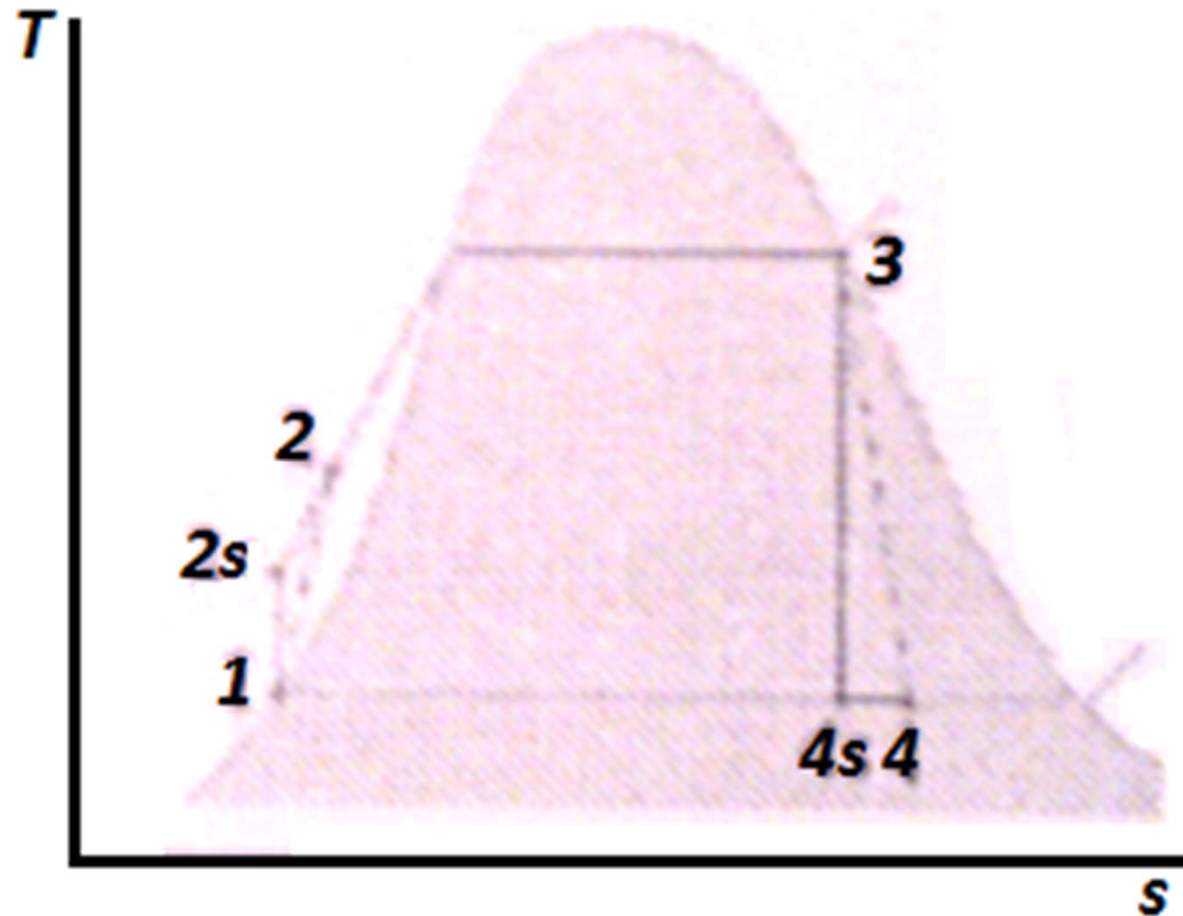
Les principales irréversibilités dans une turbine sont dues à :

- L'écoulement du fluide de travail dans la turbine;
- L'échange de chaleur avec l'extérieur.

La perte de chaleur dans la turbine vers le milieu ambiant est habituellement un phénomène d'importance secondaire, de sorte qu'on peut considérer la détente du fluide dans la turbine comme étant adiabatique. Cependant cette détente n'est pas réversible. La détente réelle est représentée sur la figure ci dessous.

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

1- Irréversibilités dans la turbine



V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

1- Irréversibilités dans la turbine

Du fait des irréversibilités liées essentiellement à l'écoulement du fluide de travail, l'entropie à la sortie de la turbine est supérieure à son entropie à l'entrée : $s_4 > s_3$.

Du fait des irréversibilités, le travail réel produit par la turbine (soit w_T) est plus faible que celui calculé en supposant une détente isentropique (soit $w_{T,s}$). Le travail réel est calculé en utilisant le rendement isentropique défini dans les chapitres précédents, soit :

$$\eta_{Sturbine} = \frac{w_T}{w_{T,S}} = \frac{w_T}{h_{4s} - h_3} = \frac{h_4 - h_3}{h_{4s} - h_3}$$

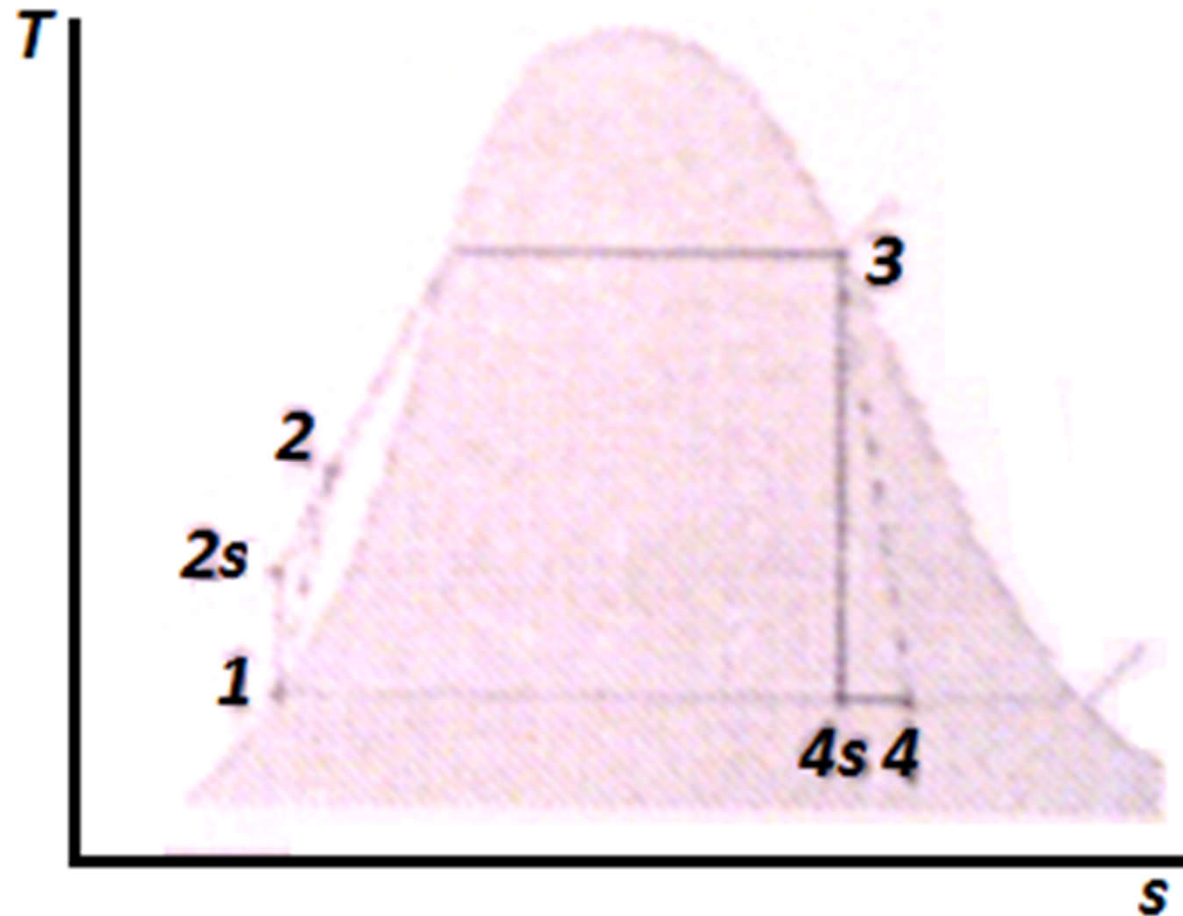
V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

2- Irréversibilités dans la pompe

Les irréversibilités dans la pompe sont semblables à celles dans la turbine. Ces irréversibilités sont ainsi essentiellement dues à l'écoulement du fluide dans la pompe. De même la perte de chaleur dans la pompe au profit du milieu ambiant est d'importance secondaire, de sorte qu'on peut considérer le pompage réel comme adiabatique mais non réversible. Le processus réel de pompage est représenté sur la figure ci-dessous.

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

2- Irréversibilités dans la pompe



V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

2- Irréversibilités dans la pompe

L'entropie à la sortie de la pompe est supérieure à l'entropie à son entrée : $S_2 > S_1$.

Du fait des irréversibilités, le fluide a besoin de plus de travail pour être pompé. Ainsi, le travail réel consommé par la pompe (soit w_p) est plus grand que celui calculé en supposant un pompage isentropique (soit $w_{T,s}$). Le travail réel est calculé en utilisant le travail isentropique défini dans le chapitre 2, soit :

$$\eta_{S\text{ pompe}} = \frac{w_{P,S}}{w_P} = \frac{h_{2s} - h_1}{w_P} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

2- Irréversibilités dans la tuyauterie

Les irréversibilités dans la tuyauterie sont dues essentiellement à l'écoulement du fluide de travail et à la perte de chaleur vers le milieu ambiant. Ainsi, en réalité :

- La pression et la température à l'entrée de la turbine sont plus faibles que celles à la sortie de la chaudière;
- La pression à l'entrée de la chaudière est plus faible que la pression à la sortie de la pompe.
- La pression dans la tuyauterie de la chaudière et du condenseur et éventuellement du réchauffeur n'est pas constante.

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

3- Irréversibilités dans la chaudière

Les irréversibilités dans la chaudière sont essentiellement dues au transfert de chaleur du combustible vers l'eau. Ces irréversibilités sont considérées comme externes car elles se produisent à l'extérieur du cycle, contrairement aux irréversibilités considérées ci-dessus, qui elles se produisent à l'intérieur du cycle et sont donc dites internes.

V- Ecart entre le cycle de Rankine et le cycle réel

4- Irréversibilités dans le condenseur

Les irréversibilités dans le condenseur sont essentiellement dues au transfert de chaleur de la vapeur vers l'eau de refroidissement. Ces irréversibilités sont aussi dites externes car elles se produisent à l'extérieur du cycle. Ces pertes sont relativement faibles comparées à celles étudiées ci-dessus.