

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

# Etude de L'influence de la surchauffe sur les installations thermiques à vapeur

Présenté par :

ACHOURI MOHAMMED AMIN

ZAOUI SID AHMED TAHAR

Soutenu publiquement le : 03/06/2018, devant le jury :

	CU Naama	Président
<b>M. MOKEDDEM LAKHDAR</b>	CU Naama	<b>Encadreur</b>
	CU Naama	Examineur

Année universitaire 2017-2018

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*A mes chers parents,*

*A mes frères et sœurs,*

*A toute ma famille et à mes amis.*

**ACHOURI**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*A mes chers parents,*

*A mes frères et sœurs,*

*A toute ma famille et à mes amis.*

*SDO*

# Remerciements

Notre premier remerciement va à **Allah soubhanou w taàla** le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

Nous remercions vivement et chaleureusement notre encadreur Monsieur **MOKADEM LAKHDAR** pour son aide et ses conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail, et particulièrement apprécié ses encouragements, ses conseils et la liberté qu'il nous a accordée dans la poursuite de notre travail. Nous lui sommes aussi très reconnaissants pour nous avoir sensibilisé à l'importance de la communication scientifique.

A tous nos professeurs du département de Génie Mécanique et les enseignants, qui ont contribué de près ou de loin de m'avoir aidé.

# Table De Matière

Dédicaces :.....	i
Remerciements :.....	iii
Table des matières : .....	iv
Liste des figures : .....	vii
Notation :.....	x

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## *Chapitre I : Les Centrales Thermiques a Vapeur*

I.1. L'historique des centrales thermiques à vapeur .....	2
I.2. Définition de la machine thermique .....	3
I.3. principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur .....	3
I.3.1. Différentes composantes d'une centrale à vapeur .....	4
I.3.1.1 <i>La pompe d'alimentation</i> .....	5
I.3.1.2 <i>Générateur de vapeur</i> .....	5
I.3.1.2.1. Récupérateur d'énergie ou économiseur.....	5
I.3.1.2.2. Les chaudières .....	6
a) Les chaudières à tubes d'eau .....	6
b) <i>Les chaudières à tubes de fumées</i> .....	7
I. 3.3.1. <i>La turbine à vapeur</i> .....	8
a) Les composant d'une turbine à vapeur .....	8
b) <i>Principe de fonctionnement</i> .....	9
c) <i>Classification des turbines</i> .....	9
I.3.4.1. <i>Le condenseur</i> .....	10
a) Condenseurs refroidis à l'eau .....	11
b) Condenseurs refroidis à l'air .....	11
c) Installation de refroidissement par les tours de refroidissement.....	11
I.4 Sources de chaleur pour la génération de la vapeur .....	13
I.4.1. Les centrale nucléaire .....	13

I.4.2. Les sources géothermiques .....	13
I. 4.3. Les centrales solaires à concentration .....	15
I.4.3.1. Les centrales à capteur cylindro -parabolique.....	15
I.4.3.2. Les centrales à tour solaire .....	16
I.4.3.3. Les centrales à capteurs paraboliques .....	17

## *Chapitre II : Les Cycle Thermodynamiques*

II.1.Définition d'un cycle thermodynamique.....	18
II.2.le cycle de Carnot .....	18
II.3.Cycle de Rankine.....	20
II.3.1.Le cycle à vapeur surchauffée de Hirn .....	21
II.3.2. Le cycle à vapeur resurchauffée.....	23
II.3.3.Les cycles à vapeur à régénération .....	25
II.3.4.Cycle combiné .....	29
II.3.5. Le cycle supercritique à vapeur .....	30
II.3.6. Cycle de vapeur binaire .....	30
II.4. les pertes d'un cycle de Rankine .....	32
II.4.1. Pertes dans la turbine et dans la pompe.....	32

## *Chapitre III : Calcul Thermique*

III.1. La notion de système .....	33
III.2. Les variables d'état.....	33
III.3. Le premier principe de la thermodynamique (principe de conservation de l'énergie).....	34
III.3.1. L'énergie totale d'un système fermé....	34
III. 3.1.1. L'énergie interne .....	35
III. 3.1.2. L'énergie cinétique.....	35
III. 3.1.3. L'énergie potentielle.....	35
III.3.2. Les transferts de l'énergie .....	35
a)Transfert thermique par conduction .....	36
b) Transfert thermique par convection.....	36
c) Transfert thermique par rayonnement.....	36
III. 3.3. Le Travail .....	36
III. 4. Énoncé du premier principe de la thermodynamique .....	37

III. 4.1. Equation de l'énergie pour un system fermée .....	37
III. 4.2. Equation de l'énergie pour un système ouvert.....	38
III.5.Application du 1er principe de la thermodynamique aux gaz parfaits .....	38
III. 5.1. Les transformations thermodynamique .....	38
III. 5. 1.1. Transformation isobare .....	39
III. 5.1. 2. Transformation isochore .....	39
III. 5.1. 3. Transformation isotherme.....	39
III. 5.1. 4. Transformation adiabatique .....	41
III. 5.1. 5. Transformation poly tropique.....	41
III.6. Le deuxième principe de la thermodynamique.....	42
III. 6. 1. L'entropie.....	42
III. 6. 2. Evolutions réversibles et irréversibles.....	43
III. 6. 3. Énoncé du deuxième principe de la thermodynamique.....	43
III.7. Calcul de cycle de Rankine surchauffé .....	44
a)La pompe .....	44
b) La chaudière .....	45
c)La turbine .....	45
d) Le condenseur .....	45
III.8. Le cycle de Rankine réel .....	46
III.9. la consommation spécifique à vapeur :.....	47

### *Chapitre IV : Programme Calcul et Résultat*

IV .1.Programme de calcul pour l'installation thermique à vapeur simple .....	48
IV.2. Programme de calcul du l'installation thermique à vapeur avec surchauffe .....	50
IV. 3.l'influence de la pression dans la chaudière .....	53
IV.4.l'influence de la pression dans le condenseur .....	57
IV.5.l'influence de la température de surchauffe .....	61
IV.5.1.l'influence de la température de surchauffe avec une pression dans la chaudière constante .....	61
IV.5.2.l'influence de la température de surchauffe pour différents pression dans la chaudière.....	65
IV.6.l'influence de l'irréversibilité des transformations thermodynamique.....	67
<i>Conclusion General :</i> .....	71
<i>Références Bibliographiques :</i> .....	72
<i>Annexe :</i> .....	74
<i>Résumé :</i> .....	89





## Table de figure

<b>Figure I. 1:</b> Schéma de principe d'une machine motrice à cycle fermé .....	4
<b>Figure I. 2 :</b> Pompe d'alimentation. ....	5
<b>Figure I. 3 :</b> Schéma explicatif d'une chaudière à tube d'eau.....	7
<b>Figure I. 4 :</b> Schéma d'une chaudière à tubes de fumée. ....	7
<b>Figure I. 5 :</b> Turbine à vapeur. ....	8
<b>Figure I. 6 :</b> Schéma fonctionnelle d'une turbine à vapeur.....	9
<b>Figure I. 7 :</b> mode de fonctionnement de la vapeur. ....	10
<b>Figure I. 8 :</b> Condenseurs refroidis à l'eau.....	11
<b>Figure I. 9 :</b> Condenseurs refroidis à l'air. ....	11
<b>Figure I. 10 :</b> Schéma d'un tour ouvert. ....	12
<b>Figure I. 11 :</b> Schéma d'un tour fermée. ....	12
<b>Figure I. 12 :</b> Schéma d'une centrale a vapeur avec un réacteur nucléaire.....	13
<b>Figure I. 13 :</b> Centrale à vapeur qui fonction avec une source géothermique.....	14
<b>Figure I. 14 :</b> Schéma d'une centrale solaire à concentration . ....	15
<b>Figure I. 15 :</b> les collecteurs cylindro-paraboliques.....	16
<b>Figure I. 16 :</b> Les centrales à tour. ....	16
<b>Figure I. 17 :</b> Les collecteurs paraboliques. ....	17
<b>Figure II. 1 :</b> Cycle de Carnot sur un diagramme (P, V). ....	19
<b>Figure II. 2 :</b> Cycles de Rankine et de Carnot sur un diagramme (T, s) . ....	19
<b>Figure II. 3 :</b> Cycle d'une machine a vapeur . ....	20
<b>Figure II. 4 :</b> Cycle de Rankine dans un diagramme (T, S).....	21
<b>Figure II. 5 :</b> Schéma d'une machine à vapeur surchauffée.....	22
<b>Figure II. 6 :</b> Cycle de Hirn sur un diagramme (T, S). ....	22
<b>Figure II. 7 :</b> schéma d'une installation motrice à vapeur resurchauffée.....	23

<b>Figure II. 8 :</b> Le cycle à vapeur resurchauffée sur un diagramme (T, S) .....	24
<b>Figure II. 9 :</b> Schéma d'une machine motrice à vapeur à soutirage avec réchauffeur.....	26
<b>Figure II. 10 :</b> Cycle idéal à soutirage avec régénérateur à contact indirect dans un diagramme (T, S).....	26
<b>Figure II. 11 :</b> Schéma d'une machine motrice à vapeur à soutirage avec réchauffeur.....	27
<b>Figure II. 12 :</b> Cycle idéal à soutirage avec régénérateur à contact direct dans un diagramme (T,S) .....	28
<b>Figure II. 13 :</b> schéma d'une installation combiné d'une turbine a gaz-cycle vapeur. ....	29
<b>Figure II. 14 :</b> Cycle supercritique .....	30
<b>Figure II. 15 :</b> schéma d'une installation motrice d'un cycle binaire (eau-mercure).....	31
<b>Figure II. 16 :</b> Cycle eau-mercure .....	31
<b>Figure II. 17 :</b> schéma explicatif des Pertes dans la turbine et dans la pompe dans un diagramme (T, S) .....	32
<b>Figure III. 1:</b> schéma explicatif des systèmes thermodynamiques. ....	33
<b>Figure III. 2 :</b> travail fourni et reçu.....	37
<b>Figure III. 3 :</b> Schéma d'un système ouvert. ....	38
<b>Figure III. 4 :</b> Transformation isobare sur un diagramme (P, V). ....	39
<b>Figure III. 5 :</b> Transformation isochore sur un diagramme (P, V). ....	40
<b>Figure III. 6 :</b> Transformation isotherme sur un diagramme (P, V). ....	40
<b>Figure III. 7 :</b> Transformation adiabatique sur un diagramme (P, V).....	41
<b>Figure III. 8 :</b> Cycle de Rankine surchauffé sur un diagramme T-S . ....	44
<b>Figure III. 9 :</b> schéma explique l'écart entre un cycle de Rankine réel et un cycle idéal .....	46
<b>Figure IV. 1 :</b> La fenêtre de MATLAB input pour simple.....	49
<b>Figure IV. 2 :</b> Cycle de Rankine simple sur MATLAB.....	49
<b>Figure IV. 3 :</b> La fenêtre de MATLAB input pour surchauffe. ....	51

<b>Figure IV. 4 :</b> cycle de Rankine surchauffe sur MATLAB.....	51
<b>Figure IV. 5 :</b> L'influence de la pression dans la chaudière sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur). .....	55
<b>Figure IV. 6 :</b> L'influence de la pression de condenseur sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur). .....	59
<b>Figure IV. 7 :</b> L'influence de la température surchauffe sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur). .....	63
<b>Figure IV. 8 :</b> L'influence de la température de surchauffe avec différentes valeurs des pressions dans la chaudière sur le rendement thermique de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe.....	66
<b>Figure IV. 9 :</b> L'influence de rendement isentropique sur les performances de L'installation thermique à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur). .....	69

## NOTATIONS

### Notations

symbole	Désignation	[Unité]
U	L'énergie interne	[J]
S	Entropie massique	[kJ/kg-1K-1]
g	Gravité	[m/s <sup>2</sup> ]
H	Enthalpie massique	[kJ/kg]
W	Le travail massique	[J/Kg]
P	Pression	[Pa]
T	Température	[K]
Q	La quantité de chaleur massique	[J/Kg]
N	le nombre de moles	[mol]
F	La force	[N]
M	La masse	[kg]
X	Le Titre en vapeur	[ ]
$\eta_{th}$	Le rendement thermique	[ ]
$\eta_{is}$	Le rendement isentropique	[ ]
$E_C$	L'énergie cinétique	[J]
$E_P$	L'énergie potentielle	[J]
$E_T$	L'énergie totale	[J]
K	Constant de transformation poly tronique	[ ]
C	La vitesse	[m/s]
V	Le volume	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}$	Le débit massique	[Kg/s]
M	la masse molaire du gaz	[kg/mol]
R	La constante des gaz parfaits	[J. mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$C_V$	Capacité calorifique à volume constante	[J/mol K]
$C_P$	Capacité calorifique à pression constante	[J/mol K]
Z	L'altitude	[m]
h f	Enthalpie saturation coté fluide	[J/kg]

## NOTATIONS

---

$h_g$	Enthalpie saturée coté gaz	[J/kg]
$S_g$	Entropie saturée coté gaz	[kJ/kg-1K-1]
$S_f$	Entropie saturée coté fluide	[kJ/kg-1K-1]
$csv$	La consommation spécifique du vapeur	[kJ/kW h]
$\rho$	La masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{w}$	Puissance	[Watt]
$Q$	Puissance de chaleur	[Watt]
$\gamma$	Constant de transformation adiabatique	[ ]

# **Introduction général**

# INTRODUCTION GENERALE

---

## Introduction générale

L'objectif de ce travail est de contribuer à la compréhension de l'influence de la surchauffe sur les centrales thermiques à vapeur.

L'étude de l'influence de la pression de condenseur, la pression dans la chaudière, la température de surchauffé et l'irréversibilité des transformations sur les performances de cycle de Rankine surchauffé est présenté.

Des études comparatives de rendement thermique entre le cycle de Rankine simple et le cycle amélioré avec surchauffe sont effectuées.

Le premier chapitre est consacré à donner quelques notions sur les centrales thermiques à vapeur et leur historique ainsi que leurs différents composants et principe de fonctionnement, ainsi que les sources de chaleur alternatives pour la génération de la vapeur.

Dans le second chapitre nous procéderons de citer les différents cycles thermodynamique à vapeur telle que le cycle de Rankine simple et les modifications portée à se cycle pour l'amélioration du travail net et rendement thermique des installations thermique à vapeur sont traités dans le second chapitre.

Le troisième chapitre traite la description des principes de la thermodynamique et leurs applications pour les gaz parfait ainsi que le calcul théorique de cycle de Rankine surchauffé.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus par les programmes développés.

Enfin une conclusion générale relatant les principaux résultats et le choix des paramètres étudié est présentée pour clore cette étude.

**Chapitre I :**  
**Les Centrales**  
**Thermique A Vapeur**



# **CHAPITRE I : LES CENTRALES THERMIQUE A VAPEUR.**

---

## **I.1. L'historique des centrales thermiques à vapeur**

Le pionnier de l'utilisation de la vapeur pour accomplir un travail est le Français Denis PAPIIN (1647-1714). Il invente la chaudière, dans laquelle l'eau est amenée à ébullition, et la combinaison cylindre-piston qui permet d'utiliser la pression de vapeur pour accomplir un travail mécanique.

En 1698, l'Anglais Thomas SAVERY (1650-1715) breveté une pompe à eau actionnée par la vapeur sous pression. La machine de Savery fut progressivement remplacée par celle de Thomas NEWCOMEN (1663-1729) achevée en 1712, basée sur le système cylindre-piston de Papin.

Le perfectionnement de la machine de Newcomen fut l'œuvre de l'Écossais James WATT (1736-1819). Watt a l'idée de séparer complètement la fonction refroidissement du cylindre : il invente le condenseur vers lequel la vapeur est évacuée à chaque cycle et dans lequel elle est refroidie. Il propose un mécanisme à double action : la vapeur pousse le piston dans les deux sens. Il invente aussi le système bielle-manivelle pour convertir le mouvement alternatif du piston en mouvement circulaire ainsi qu'un dispositif de régulation de l'entrée de la vapeur. Watt brevète la machine à double action en 1780.

Dans le souci d'optimiser la machine à vapeur, il découvre avec Joseph Black la chaleur latente, c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur, sans changement de température. Watt produit un diagramme donnant la pression de la vapeur en fonction de la température (l'indicateur de Watt), diagramme qui restera un secret industriel jusqu'au début du XIXe siècle.

La machine de Watt trouva de nombreuses applications dans les transports : véhicule automobile, navire à vapeur, locomotive sur rail... A partir du XIXe siècle, les chemins de fer apparaissent dans tous les pays développés et les navires à voile sont progressivement remplacés par les navires à vapeur [1].

## **I.2. Définition de la machine thermique**

Une machine thermique est un ensemble plus ou moins complexe destiné à faire en sorte qu'un système thermodynamique échange de la chaleur et du travail avec le milieu extérieur. Une machine thermique doit pouvoir fonctionner pendant une durée indéfinie. Ce n'est possible que si le système thermodynamique utilisé effectue des cycles, c'est à dire s'il revient périodiquement à son état initial. Lorsque la machine échange de la matière avec son environnement, elle est dite ouverte.

Dans le cas contraire, elle est dite à cycle fermé, tel que la machine à vapeur. Une machine est dite motrice si, à l'issue d'un cycle, elle a fourni un travail au milieu extérieur comme la machine à vapeur et la centrale de production d'électricité, elle est dite réceptrice dans le cas contraire. Les machines motrices à cycle fermé utilisent la plupart du temps un fluide diphasique. Le transfert de l'énergie entre les différents organes de la machine repose ainsi sur la chaleur latente de changement de phase, ce qui permet à débit de fluide égal un transfert d'énergie beaucoup plus important que celui qui serait basé sur la chaleur sensible d'un fluide monophasique [2].

## **I.3. principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur**

Le principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur est comme le suivant : La source chaude est constituée des gaz brûlés issus de la combustion de charbon, de fuel, etc., ou bien par le circuit d'eau primaire d'une centrale nucléaire ou une autre source de chaleur-t-elle que l'énergie solaire. La chaleur  $Q_1$  (voire figure I.1) est transférée de la source chaude au fluide dans le bouilleur (également appelé générateur de vapeur). Le fluide est mis en contact avec la source froide dans le condenseur, dans lequel on lui retire une chaleur  $Q_2$ . Enfin, le fluide cède un travail  $W_t$  dans la turbine. Une partie de ce travail est récupéré pour actionner la pompe, qui ramène le fluide dans son état initial [3].

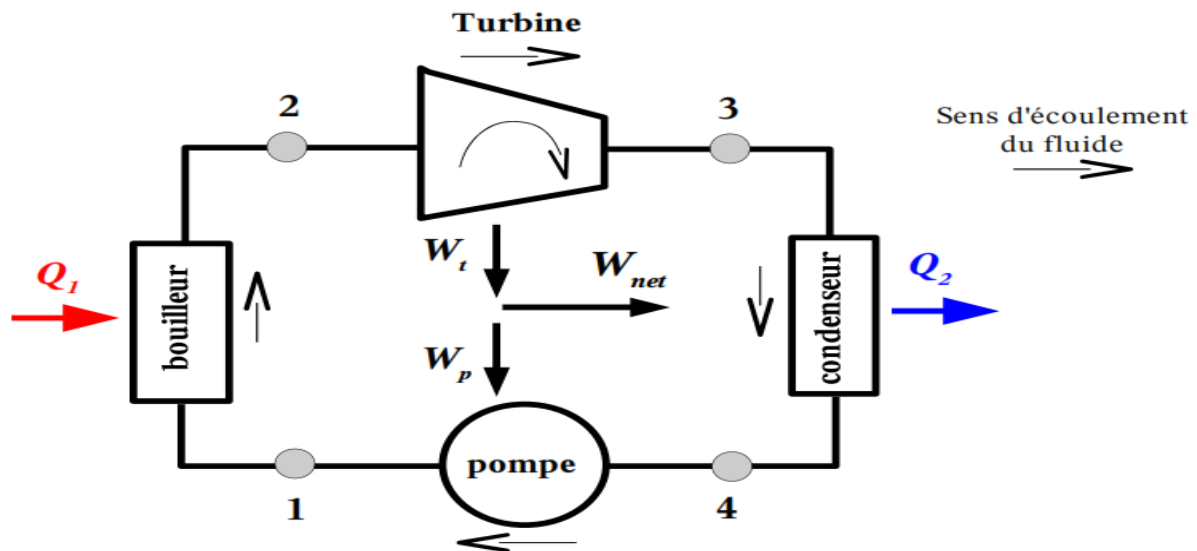


Figure I. 1:Schéma de principe d'une machine motrice à cycle fermé

### I.3.1. Différentes composantes d'une centrale à vapeur

Une installation de turbine à vapeur est constituée principalement des 5 éléments suivants :

#### 1. Générateur de vapeur; comprenant :

- Récupérateur d'énergie ou économiseur: L'eau est chauffée à pression constante jusqu'à la température d'ébullition.
- Chaudière : L'eau s'évapore à pression constante et à température constante jusqu'à l'état de vapeur saturée sèche.
- Surchauffeur : La vapeur d'eau est surchauffée à pression constante jusqu'à la température de surchauffe.

**2. Turbine à vapeur** : La vapeur se détend de l'état caractérisé par une pression et une température, jusqu'à la base pression, produisant ainsi un travail mécanique.

**3. Condenseur** : Pour extraire un travail aussi élevé que possible, il faut que la base pression de sortie de la turbine soit la plus faible possible. Pour cela on utilise un dispositif spécial qui est le condenseur où on enlève, de la vapeur, la chaleur latente de vaporisation. Dans le condenseur, le fluide passe à l'état liquide à pression constante.

**4. Pompe** : Elle sert à augmenter la pression de l'eau de la base pression à la haute pression.

**5. Machine réceptrice** : Cette machine est généralement un alternateur [4].

# CHAPITRE I : LES CENTRALES THERMIQUE A VAPEUR.

## ***I.3.1.1 La pompe d'alimentation***

La compression d'un fluide demandera une puissance mécanique Les pompes sont usuellement de type centrifuge et alimentées par un moteur électrique.

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute. Le fluide arrivant par l'ouïe est dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute. Un diffuseur à la périphérie de la roue permet d'optimiser le flux sortant est ainsi de limiter les pertes d'énergie [5].



**Figure I. 2 : Pompe d'alimentation.**

## ***I.3.1.2 Générateur de vapeur***

Dans les centrales à vapeur, les apports de chaleur se font à pression constante.

### ***I.3.1.2.1. Récupérateur d'énergie ou économiseur***

Les récupérateurs d'énergie ou économiseur utilisant la chaleur disponible dans des fluides de procédés à haute température ou dans les fumées de fours ou de turbines à gaz. En fonction de la nature des fluides et de leurs conditions de disponibilité, les chaudières de récupération peuvent être construites comme les chaudières conventionnelles, n'en utiliser que des éléments ou encore faire l'objet d'une technologie spéciale [3].

# **CHAPITRE I : LES CENTRALES THERMIQUE A VAPEUR.**

---

## *I.3.1.2.2. Les chaudières*

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur, nécessaire au fonctionnement des procédés.

Types de chaudières :

La chaudière se compose de deux compartiments distincts : l'un dans lequel brûlent le combustible et un autre dans lequel l'eau est chauffée. On distingue ainsi deux types de chaudière à combustible en fonction de la circulation de l'eau à chauffer par rapport à la chaleur de combustion :

- Les chaudières à tube de fumée.
- Les chaudières à tube d'eau.

### **a) Les chaudières à tubes d'eau**

Les parois d'une chaudière à tubes d'eau sont constituées de panneaux de tubes munis d'ailettes longitudinales opposées permettant de les souder entre eux et de réaliser ainsi une construction étanche.

Dans les chaudières à tubes d'eau, la combustion est réalisée dans une enceinte, laquelle est tapissée de tubes d'eau. Ces tubes sont alimentés par deux ballons, l'un en partie supérieure avec régulation de niveau, l'autre en partie basse en charge. L'eau mise en ébullition dans les tubes circule du bas vers le haut par effet thermosiphon.

Ces chaudières sont équipées de différentes zones d'échange de chaleur, permettant de surchauffer la vapeur produite et de préchauffer l'eau alimentaire à l'aide des fumées déjà préalablement refroidies. Ce sont des chaudières pouvant atteindre de fortes pressions et de fortes puissances.

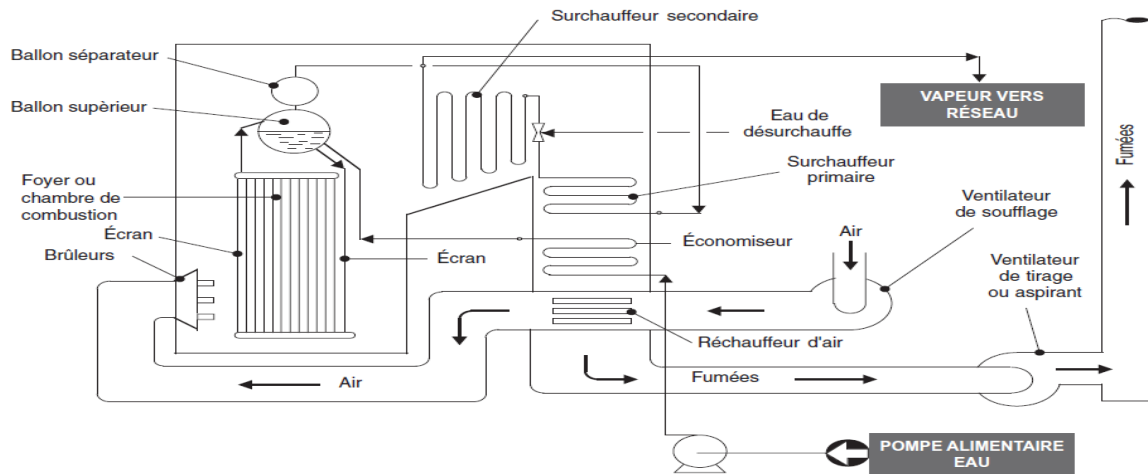


Figure I. 3 : Schéma explicatif d'une chaudière à tube d'eau.

**b) Les chaudières à tubes de fumées**

Les chaudières à tubes de fumées sont le plus généralement des petites chaudières, générant de la vapeur saturée à une pression inférieure à une vingtaine de bar.

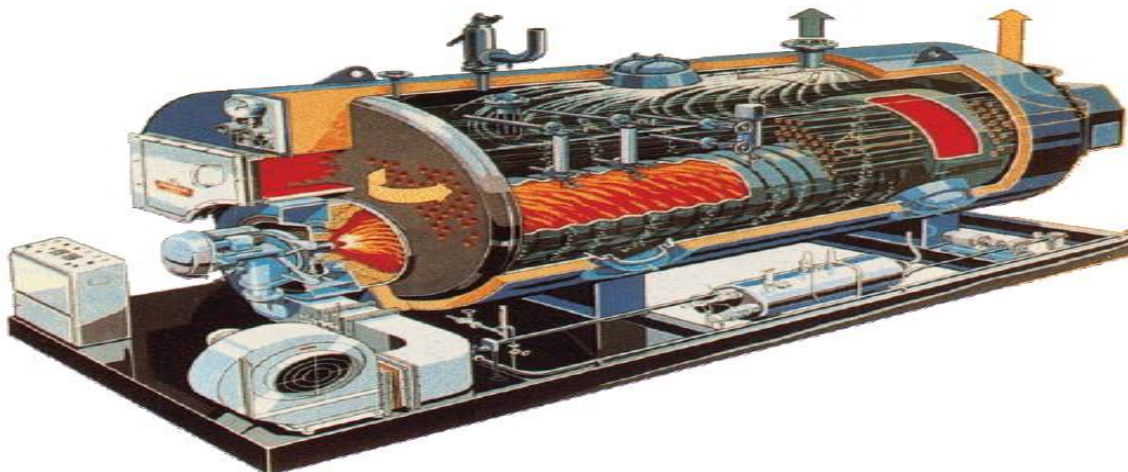


Figure I. 4 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumée.

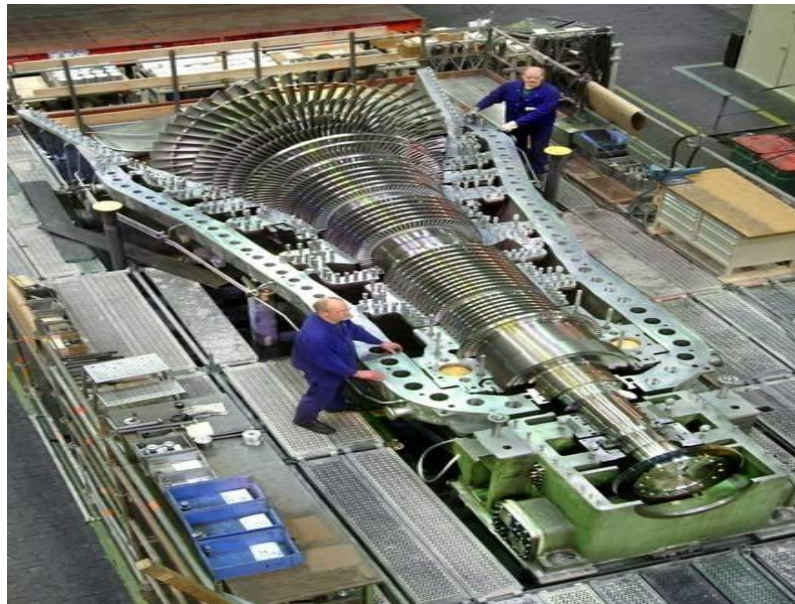
Dans les chaudières à tubes de fumées, la flamme et les fumées qui résultent de la combustion circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de tubes immergés dans une calandre formant le réservoir d'eau.

La circulation des fumées est en plusieurs passes, la première passe étant généralement constituée d'un seul tube de gros diamètre. Ces chaudières peuvent être équipées d'un ou de plusieurs brûleurs. Elles produisent généralement de la vapeur saturante, directement issue de l'ébullition dans le réservoir d'eau. Ce sont des chaudières à pression et capacité faible à moyenne [6].

**I. 3.1.3. La turbine à vapeur**

La turbine à vapeur est la pièce maîtresse de toutes les installations à vapeur, sont des appareils à écoulement continu, ce qui veut dire que, pour un régime de fonctionnement donné, l'état du fluide est invariable en tout point. Cette propriété leur permet de fonctionner avec des débits très importants et rend donc possible la réalisation de machines de grande puissance [3].

Une turbine à vapeur est un moteur constitué d'un grand nombre de roues portant des ailettes. La vapeur saturée ou surchauffée qui entre est sous pression, elle traverse les roues mobiles et sort à faible pression.



**Figure I. 5 : Turbine à vapeur.**

**a) Les composants d'une turbine à vapeur**

La turbine à vapeur est constituée de deux éléments principaux, sont comme suit.

**• Le rotor :**

C'est la partie motrice de la turbine. Il est constitué d'une ou de plusieurs roues calées sur un arbre. Ces roues portent sur leur périphérie des ailettes radiales appelées aubes, même le rotor contient deux parties, partie HP et partie BP.

**• Le stator :**

Il est généralement constitué en deux parties qui se referment sur le rotor suivant un plan de joint diamétral horizontal. une partie HP et l'autre BP.

## CHAPITRE I : LES CENTRALES THERMIQUE A VAPEUR.

Le Corps HP composé d'une enveloppe extérieure d'une forme régulière pour éviter les déformations, et une enveloppe interne portant les tuyères de l'aubage.

Le corps BP composé d'une enveloppe en fonte de deux parties assemblées suivant le plant horizontale et portant des aubage fixe ainsi que la tubulaire d'amenée de vapeur, avec des tubulaires d'échappement.

### b) *Principe de fonctionnement*

La vapeur admise dans la turbine par la vanne d'admission est détendue dans une ou plusieurs tuyères. A la sortie de la tuyère la vapeur est animée d'une très grande vitesse, La vapeur vient alors percuter les ailettes de la roue de la turbine qu'elle met alors en rotation.

A vitesse constante la puissance fournie par la turbine est égale à celle consommée par la machine entraînée. Toute variation de la puissance consommée, entraîne une variation de la vitesse de rotation si l'on ne modifie pas la puissance motrice de la turbine.

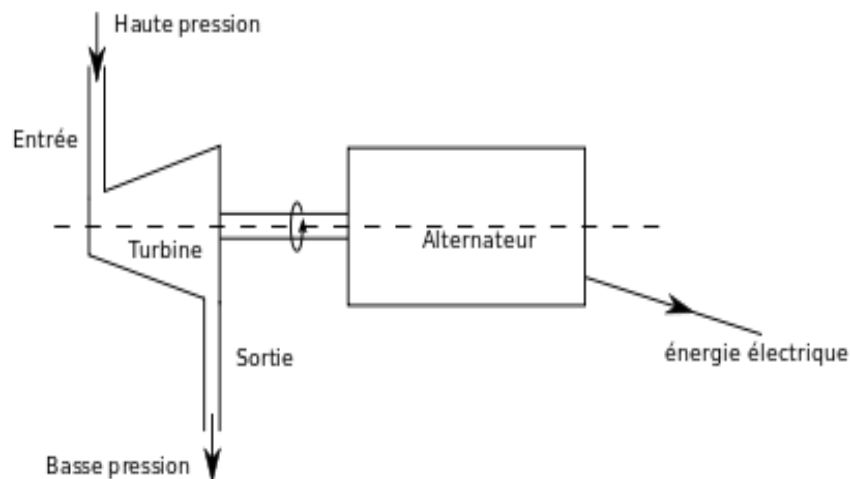


Figure I. 6 : Schéma fonctionnelle d'une turbine à vapeur.

### c) *Classification des turbines*

On peut classer les turbines selon le critère d'action :

Dans ce mode Les turbines à vapeur se classent en deux grandes catégories :



# CHAPITRE I : LES CENTRALES THERMIQUE A VAPEUR.

## ➤ Les turbines à action :

Où la chute d'enthalpie est utilisée en totalité dans la tuyère pour engendrer de l'énergie cinétique, qu'est transformée à son tour en énergie mécanique dans la roue voir figure I.7.a

La turbine peut être monocellulaire, bicellulaire, ou multicellulaire. Dans les deux derniers cas, la transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique a lieu en plusieurs étapes. Dans les canaux fixes intermédiaires, entre les canaux mobiles, il n'existe aucune transformation d'énergie, seule la direction de la vitesse est modifiée.

## ➤ Les turbines à réaction :

Dans lesquelles une parti seulement de la chute thermique mise à la position de l'étage, est transformée en énergie cinétique dans le distributeur, le reste est transformé en énergie cinétique dans les aubages mobiles de la roue figure I.7.b [7].

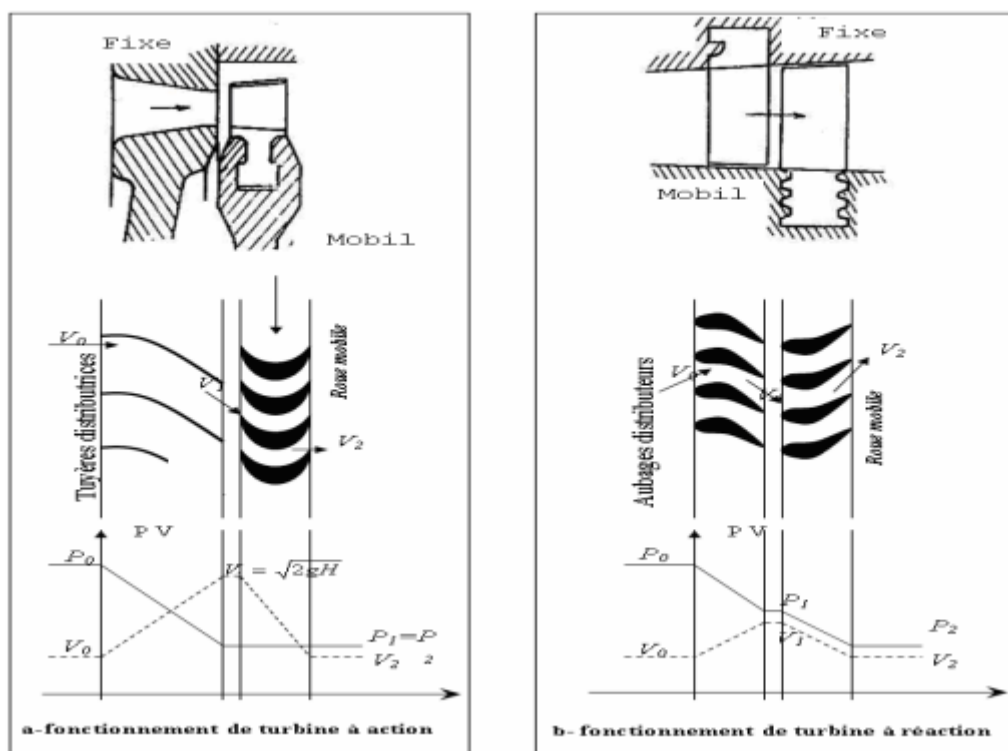


Figure I. 7 : mode de fonctionnement de la vapeur.

### I.3.1.4. Le condenseur

Le condenseur composant le moins glorieux de l'installation, est en charge de rejeter toute la chaleur dont l'utilisateur ne sait plus faire usage, l'eau y est toujours refroidie à pression constante, ce qui ne nécessite pas de pièce mobile. Technologiquement, c'est un élément simple, on met la canalisation de vapeur en contact avec un circuit de température basse [3].

Il y a trois types des condenseurs:

## a) Condenseurs refroidis à l'eau

Sont généralement des échangeurs multitubes, le fluide frigorigène s'écoulant dans la calandre et le fluide refroidisseur dans les tubes. Un condenseur refroidis à l'eau exige une source de l'eau fraîche, Propre et peu couteuse.

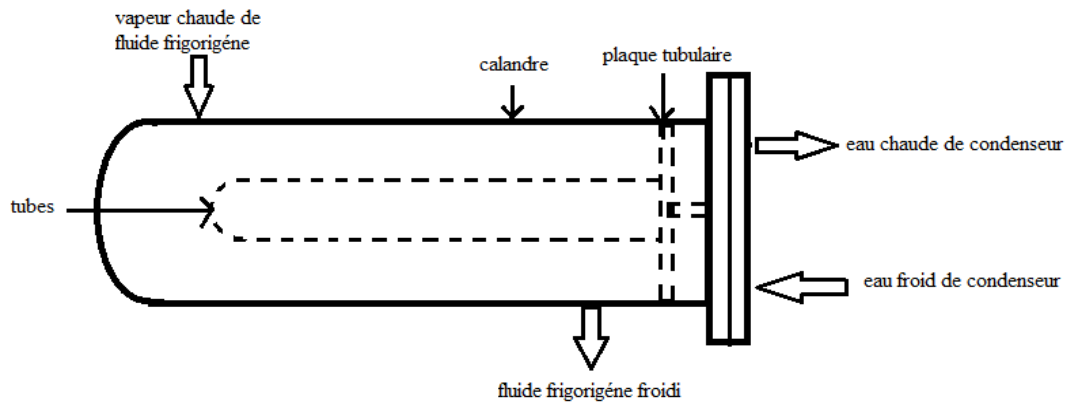


Figure I. 8 : Condenseurs refroidis à l'eau.

## b) Condenseurs refroidis à l'air

Les condenseurs refroidis à l'air utilisent l'air extérieur comme médium de refroidissement des ventilateurs aspirent l'air à travers un serpentin de refroidissement dans lequel circule le fluide frigorigène.

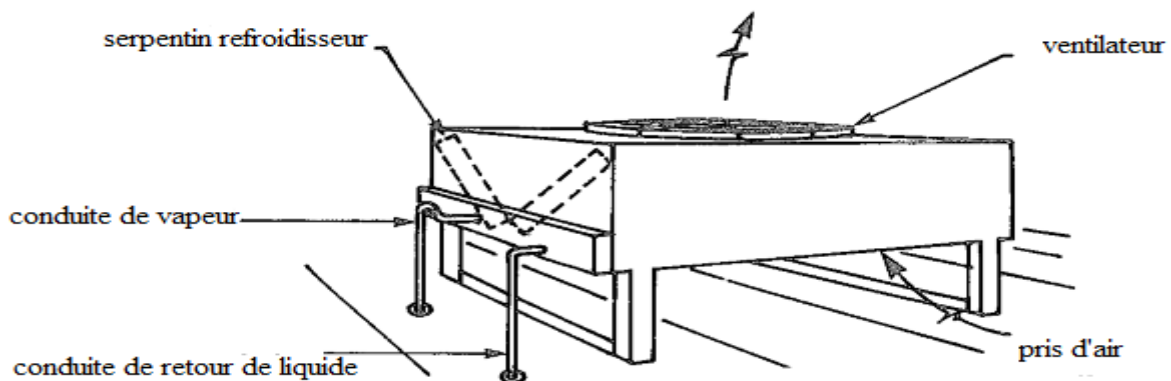


Figure I. 9 : Condenseurs refroidis à l'air.

## c) Installation de refroidissement par les tours de refroidissement

Ce type d'installation est basé sur les deux principes suivants :

- À travers une tour de refroidissement ouvert :

L'eau provenant à refroidir est dispersée en fines gouttelettes par une ou plusieurs rampes de dispersion. L'eau traverse alors de haut en bas une surface d'échange constituée

## CHAPITRE I : LES CENTRALES THERMIQUE A VAPEUR.

par le packing. Ce packing peut être considéré comme un échangeur air/fluide avec une surface d'échange élevée de par sa constitution. L'eau refroidie est collectée dans un bassin de rétention en bas de la tour avant de retourner vers le procédé à refroidir, directement ou via l'échangeur intermédiaire. L'air est mis en mouvement par un ventilateur ou par tirage naturel. Il y a donc contact direct de l'eau venant du procédé avec l'air extérieur.

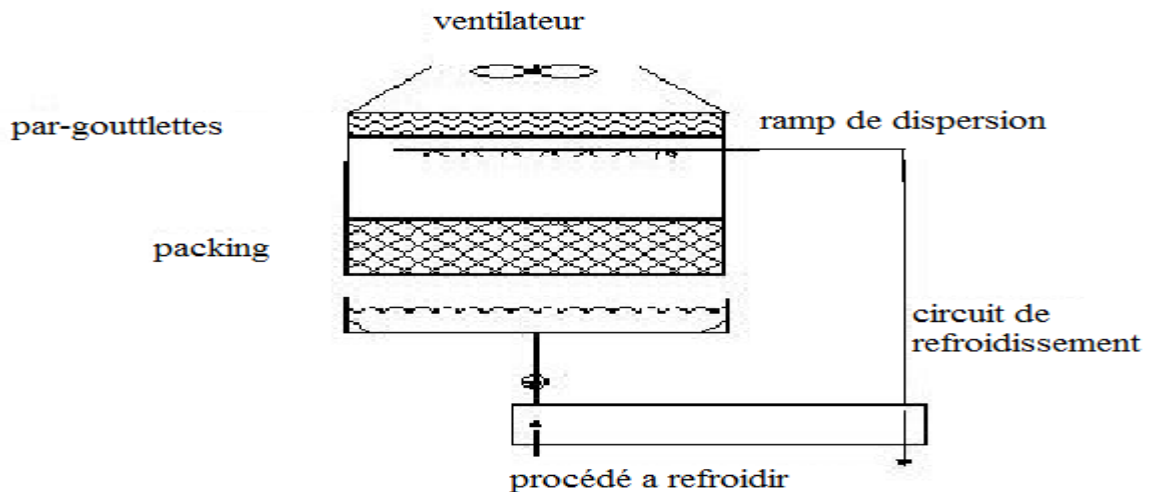


Figure I. 10 : Schéma d'un tour ouvert.

- À travers une tour de refroidissement fermée :

Dans une tour fermée, le fluide du procédé à refroidir circule dans un échangeur tubulaire. Il n'y a donc plus de contact direct entre le fluide du circuit primaire et l'air. Le refroidissement est assuré par évaporation d'une partie de l'eau dispersée du circuit tour, provenant du bassin de rétention et complétée par l'appoint en eau. La puissance disponible avec ces tours fermées est légèrement inférieure à celle d'une tour ouverte [8] .

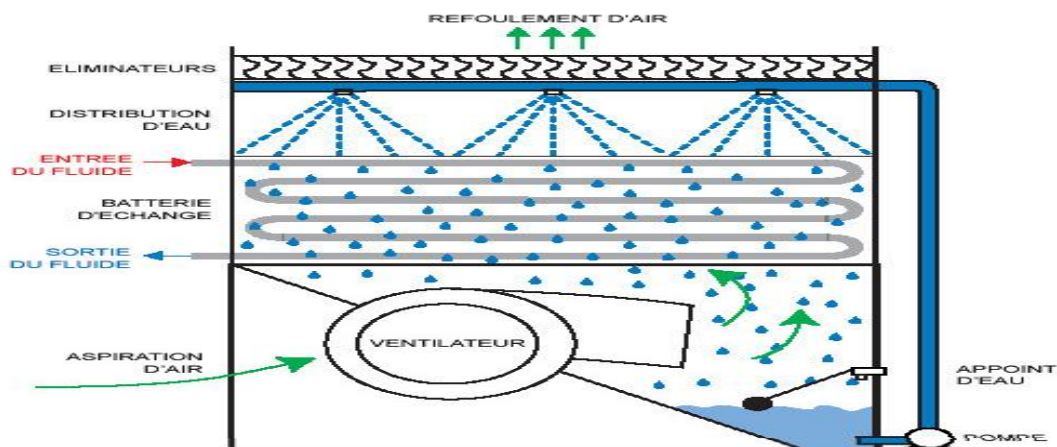


Figure I. 11 : Schéma d'un tour fermée.

## I.4 Sources de chaleur pour la génération de la vapeur

### I.4.1. Les centrale nucléaire

Dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur. L'eau est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir. Ce circuit fermé est appelé circuit primaire.

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif [9].

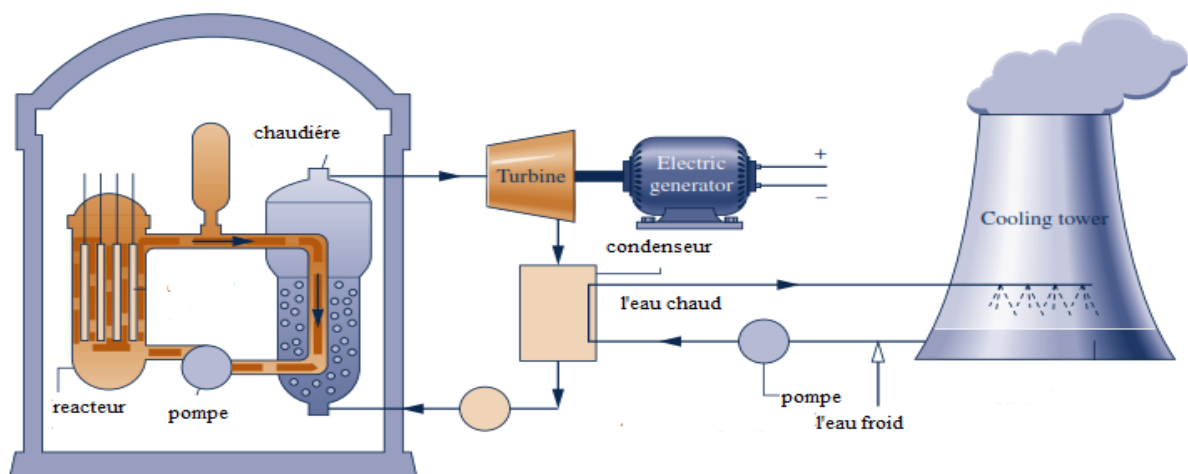


Figure I. 12 : Schéma d'une centrale a vapeur avec un réacteur nucléaire. [10].

### I.4.2. Les sources géothermiques

À la différence des énergies fossiles, la géothermie est présente dans tous les sous-sols et sous tous les climats. C'est une énergie propre qui ne participe pas à la dégradation du climat et qui ne nécessite ni transport ni stockage de substances polluantes ou dangereuses. En profondeur, la planète dispose d'un stock de chaleur illimité à l'échelle humaine ses usages sont variés, car elle présente une large gamme de températures et de profondeurs.

On distingue trois types de sources géothermiques, très basse énergie, basse et moyenne énergie, haut énergie.

Le type qui est utilisé dans l'industrie pour la production de l'électricité est de haut énergie, à partir des réservoirs sous-sols dont la température est comprise entre 150 et 350 °C et permettant des débits de production de fluides suffisants.

Pour les sources de vapeur haute température, que l'on retrouve notamment sur les zones de volcanisme récent, l'électricité peut être produite directement par injection de la vapeur dans une turbine haute pression ou haute et basse pression.

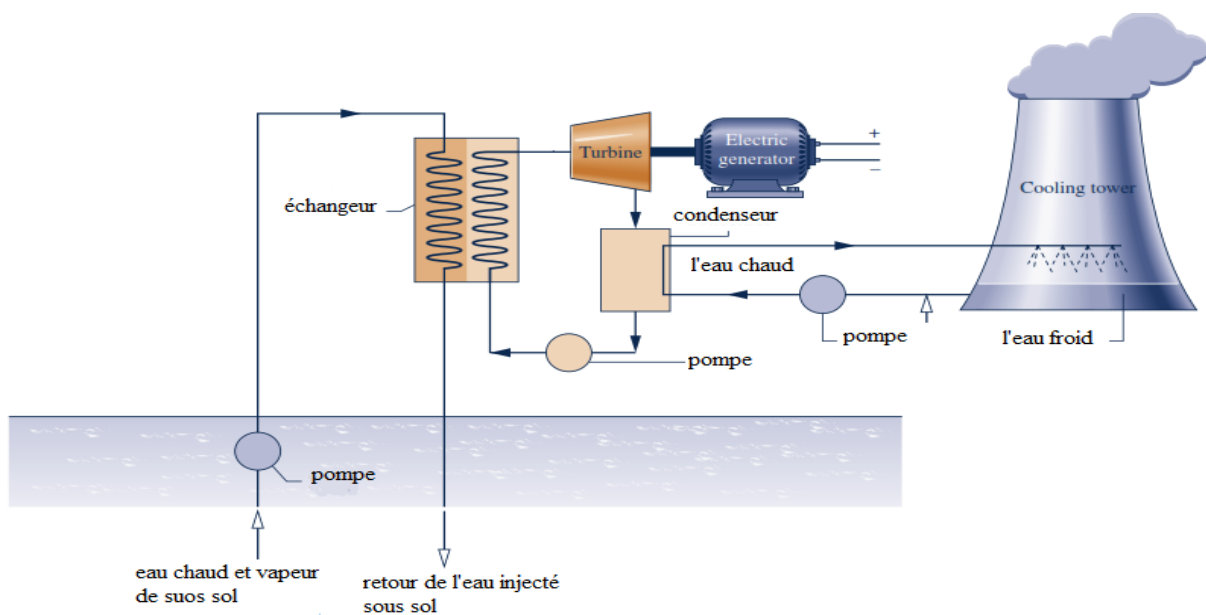


Figure I. 13 : Centrale à vapeur qui fonction avec une source géothermique. [10]

La figure I.13 montre un exemple d'exploitation d'une source géothermique pour la production de l'électricité.

Injection de l'eau froide à 5000 m de profondeur par le puits centrale, la circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude permet extraction à haute pression l'eau réchauffée du sous-sol par deux puits de la production. En surface, transformation par l'intermédiaire d'un échangeur thermique de l'eau chaude du circuit primaire en vapeur dans le circuit secondaire pour entraîner une turbine qui produit de l'électricité [11].

#### I. 4.3. Les centrales solaires à concentration

Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité.

Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable. Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

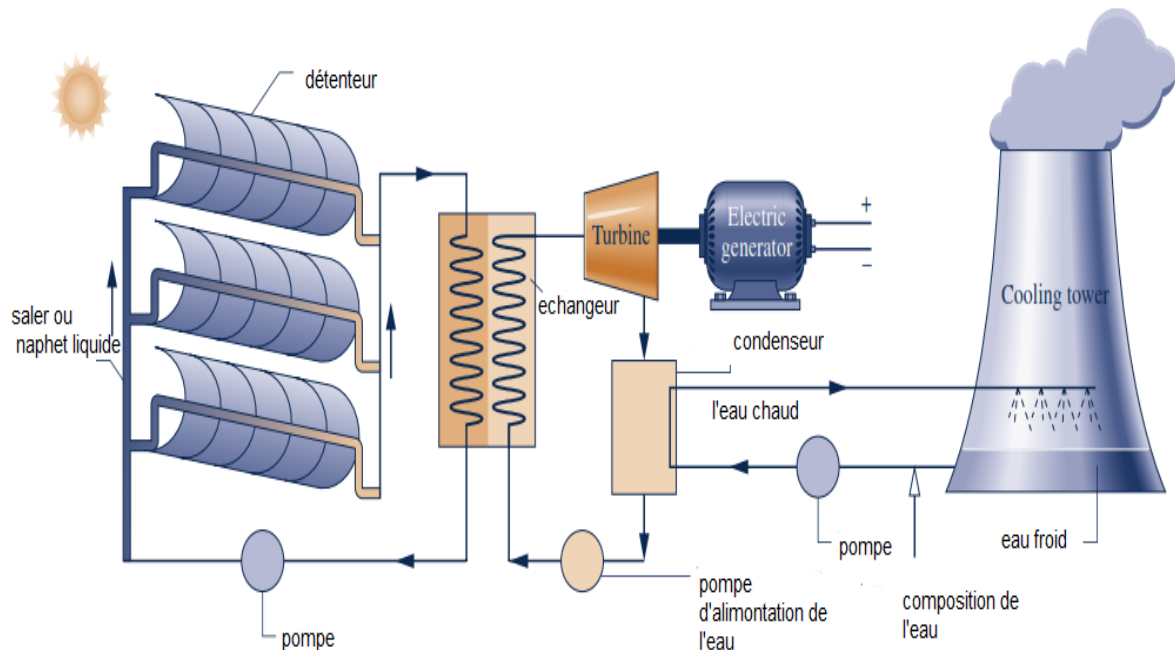


Figure I. 14 : Schéma d'une centrale solaire à concentration . [10]

Il y a trois grandes familles de technologie de concentration solaire. Les centrales à capteurs cylindro -paraboliques, les centrales à tour solaire et les centrales à capteurs paraboliques.

#### I.4.3.1. Les centrales à capteur cylindro -parabolique

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à une température d'environ 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique.



Figure I. 15 : les collecteurs cylindro-paraboliques.

#### I.4.3.2. Les centrales à tour solaire

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour.

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un receveur au sommet de la tour solaire.

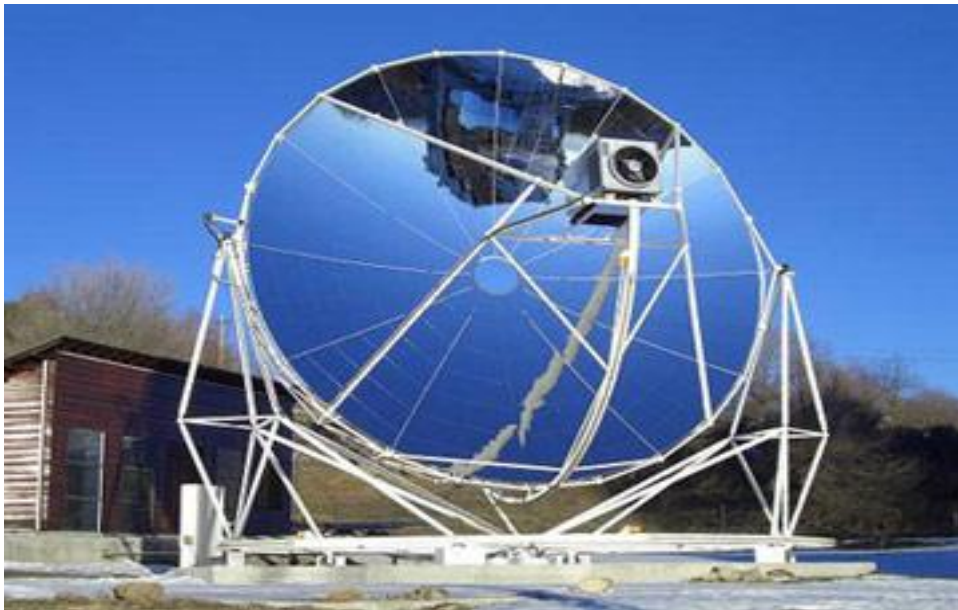


Figure I. 16 : Les centrales à tour.

### I.4.3.3. Les centrales à capteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante.

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%).



**Figure I. 17 : Les collecteurs paraboliques.**

Le concentrateur solaire est composé d'une surface réfléchissante de verre ou de plastique et concentre le rayonnement incident à son foyer. Sa taille dépend évidemment de la puissance solaire requise. le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le concentrateur et la transfère au fluide de travail du cycle de puissance. La température de la source chaude peut être adaptée en plaçant le récepteur plus ou moins loin du foyer du collecteur.

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique, ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud [12].



**Chapitre II :**  
**Les Cycles**  
**Thermodynamiques**

### II.1. Définition d'un cycle thermodynamique

Un cycle est une évolution au cours de laquelle un fluide subit plusieurs transformations l'amenant à passer par différents états thermodynamiques avec la condition que l'état final est rigoureusement égal à l'état initial. Ce cycle doit être soit fermé soit ouvert. Pour un cycle fermé, le fluide est à l'intérieur d'une machine, il n'échange que de l'énergie et pas de matière avec l'extérieur. La machine cyclique peut alors être considérée comme un système thermodynamique fermé. Pour un cycle ouvert, où la matière se renouvelle, comme les gaz frais remplacent les gaz brûlés dans un moteur d'automobile [13].

### II.2. le cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique idéal car il possède le meilleur rendement faisable pour un travail donné à partir de deux sources de chaleur. Il fut publié par Sadi Carnot en 1824 dans son unique ouvrage "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance". Le cycle est constitué de quatre processus réversibles.

- une détente isotherme (A-B) : le système part du point A à la température  $T_1$ . Le gaz est soumis à une détente isotherme de A à B tout en restant en contact avec un réservoir chaud à la température  $T_1$ . Durant ce processus, l'énergie interne du gaz parfait, qui dépend uniquement de sa température, ne varie pas. Le gaz absorbe une quantité de chaleur  $|Q_1|$  et accomplit un travail  $W_{AB}$ .
- une détente adiabatique réversible donc isentropique (B-C). On supprime le réservoir chaud et on isole thermiquement le système du milieu extérieur. Le gaz est soumis à une détente adiabatique ( $Q=0$ ) de B à C. Il effectue un travail positif  $W_{BC}$ , aux dépens de son énergie interne jusqu'à ce que la température tombe à  $T_2$ .
- une compression isotherme (C-D). Le gaz est mis en contact avec un réservoir froid à la température  $T_2$  et il subit une compression isotherme de C à D. Le gaz effectue un travail négatif  $W_{CD}$  et cède une quantité égale de chaleur  $|Q_2|$  au réservoir froid.
- une compression adiabatique réversible donc isentropique (D-A). Durant cette compression, la température monte jusqu'à  $T_1$ . Le travail adiabatique effectué par le gaz est égal à l'opposé du travail de l'étape de détente adiabatique, c'est-à-dire  $W_{DA} = -W_{BC}$ , parce que les variations d'énergie interne ont la même valeur absolue.

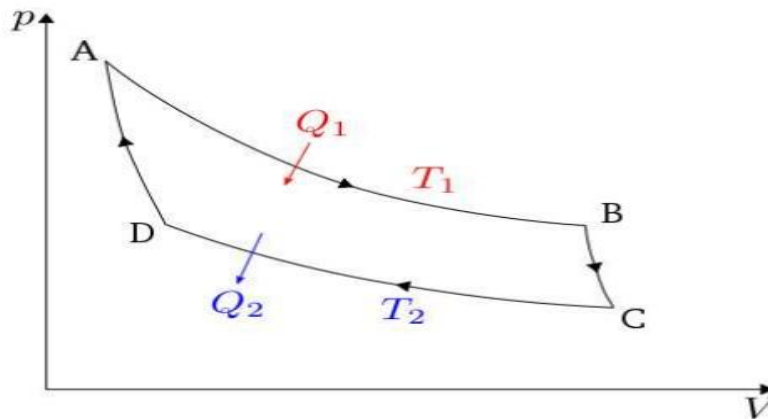


Figure II. 1 : Cycle de Carnot sur un diagramme (P, V).

Le cycle étant fermé, la quantité de matière est constante et l'énergie interne du gaz ne varie pas.

C'est le cycle le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes. Le cycle inverse est le moyen le plus efficace de transférer de la chaleur d'une source froide à une source chaude à partir d'une source de travail. L'efficacité des autres cycles et des machines réelles est comparée à celle du cycle de Carnot par le biais du rendement, un nombre sans dimension compris entre 0 (efficacité nulle) et 1 (efficacité parfaite). On voit clairement qu'un rendement de 100% est difficilement atteignable sauf dans le cas théorique ou  $T_2 = 0$  K.

Dans les cycles moteurs à vapeur, un fluide (généralement l'eau) est utilisé. Au cours d'un tel cycle, des changements de phase ont lieu dans une étape de vaporisation et dans une étape de condensation. Le cycle est souvent fermé mais il peut être ouvert. Théoriquement, il est possible de tirer profit du changement de phase pour concevoir un cycle de Carnot constitué de deux isothermes et deux adiabates réversibles [14].

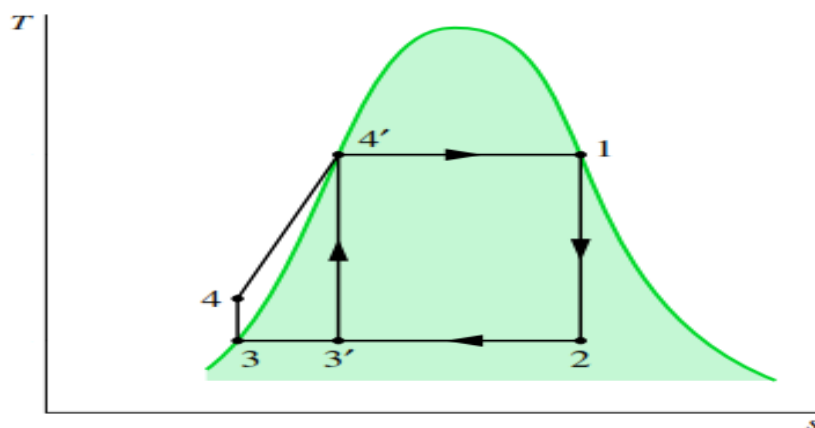


Figure II. 2 : Cycles de Rankine et de Carnot sur un diagramme (T, s) [13].

### II.3.Cycle de Rankine

En pratique, l'utilisation du cycle de Carnot pose plusieurs difficultés :

- La compression d'un mélange diphasique est technologiquement difficile.
- Dans le condenseur, il est difficile d'interrompre la condensation à un endroit précis

William Rankine, ingénieur anglo-saxon digne de ses compatriotes, propose en 1859 une modification du cycle en poursuivant la condensation jusqu'à saturation et en ne compressant l'eau qu'à l'état liquide.

Le cycle de Rankine utilise donc une pompe à eau liquide plutôt qu'un compresseur en mélange liquide/vapeur. Technologiquement, une pompe est plus simple à concevoir, fabriquer, et opérer qu'un compresseur. Autre avantage, la compression d'un liquide est plusieurs dizaines de fois plus économe en énergie que celle du mélange [3].

Le cycle de Rankine c'est le cycle de base d'un cycle à vapeur. Un moteur thermique fonctionnant avec une turbine à vapeur pour produire de l'énergie mécanique, comporte un générateur de vapeur, une turbine, un condenseur et une pompe. Le fluide utilisé est généralement l'eau.

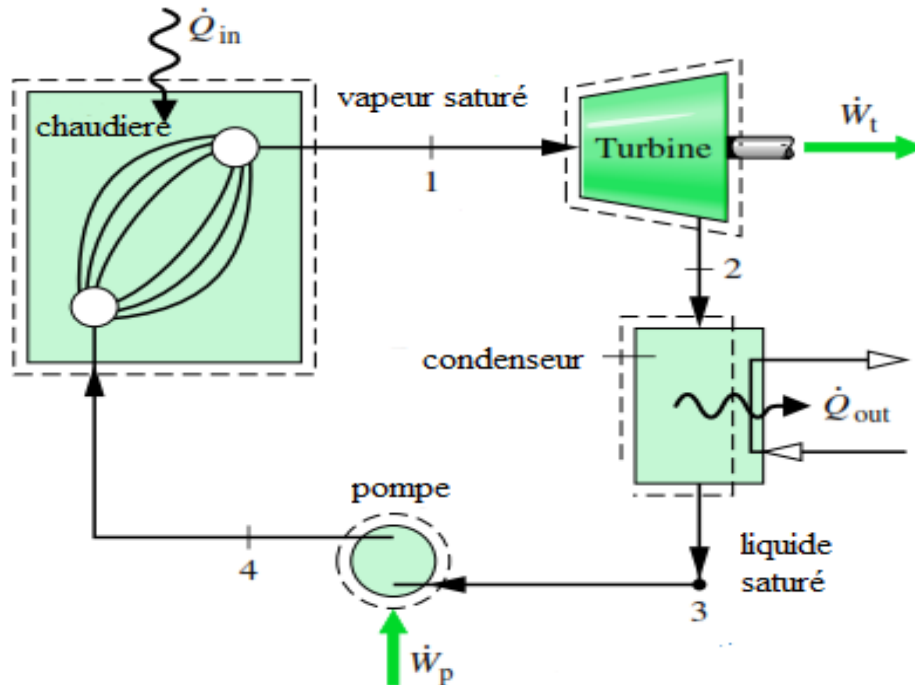


Figure II. 3 : Cycle d'une machine à vapeur [13].

Dans cette unité, il existe un circuit haute pression (HP) comprenant le générateur de vapeur où se produit un changement de phase à pression et température constantes et un circuit basse pression (BP) où se produit la condensation à pression et température constantes. Ces deux circuits sont connectés via d'une part une pompe qui permet de comprimer le liquide pour le faire passer du circuit BP au circuit HP et d'autre part d'une turbine qui détend la vapeur pour la transférer du circuit HP vers le circuit BP où elle se condense.

Le cycle de base d'une turbine à vapeur est un cycle de Rankine qui comprend deux isobares et deux adiabates et peut être décrit dans un diagramme entropique ( $T, s$ ) ou ( $h, s$ ).

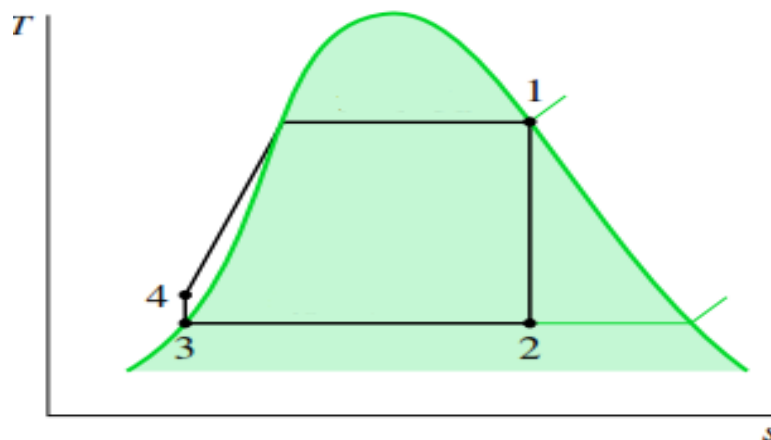


Figure II. 4 : Cycle de Rankine dans un diagramme ( $T, S$ ) [13].

- 3-4 compression d'eau dans la pompe, passage de base pression à haut pression (BP à HP).
- 4-1 chauffage isobare et évaporation isobare et isotherme dans le générateur de vapeur.
- 1- 2 détente adiabatique dans la turbine de haut pression à base pression (HP à BP).
- 2 - 3 condensation isobare et isotherme jusqu'à eau liquide [15].

L'efficacité thermique d'un cycle de Rankine peut être améliorée par certaines modifications :

### II.3.1. Le cycle à vapeur surchauffée de Hirn

Dans le cycle à surchauffe, on utilise une source chaude à plus haute température puisque la température de la source chaude est alors supérieure à la température critique. Cela amène à effectuer le changement de phase à une température inférieure à la température critique puis à surchauffer la vapeur à une température supérieure à la température de l'équilibre liquide-vapeur.

La méthode pour obtenir la vapeur surchauffée est d'envoyer la vapeur sèche en sortie de générateur de vapeur dans un surchauffeur où la vapeur est portée, à pression constante, à une température plus élevée [13].

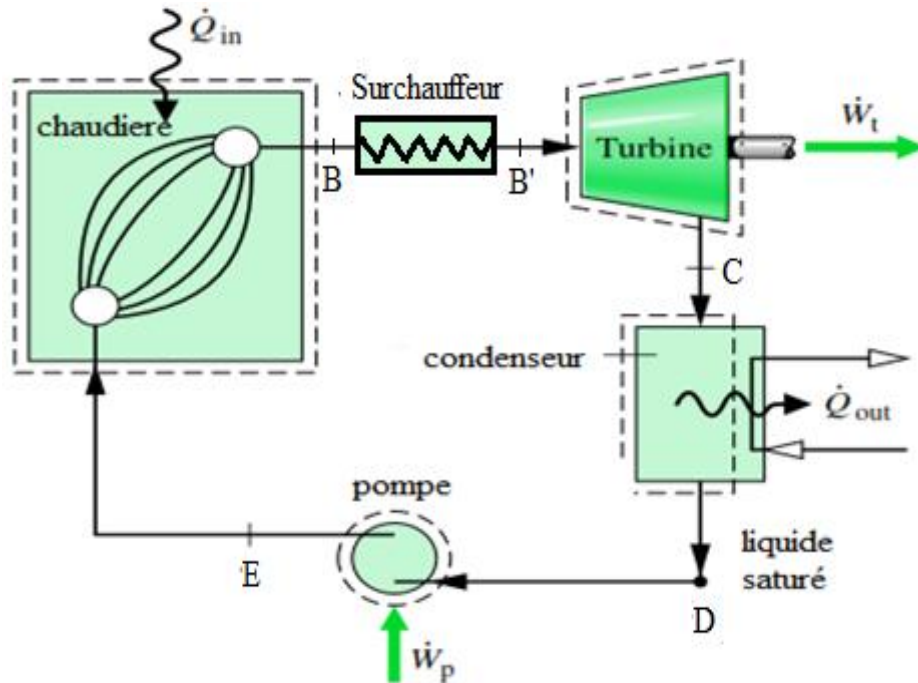


Figure II. 5 : Schéma d'une machine à vapeur surchauffée [13].

La surchauffe consiste donc simplement à élever la température moyenne d'utilisation de la chaleur de la source chaude tout en conservant la même température de source froide.

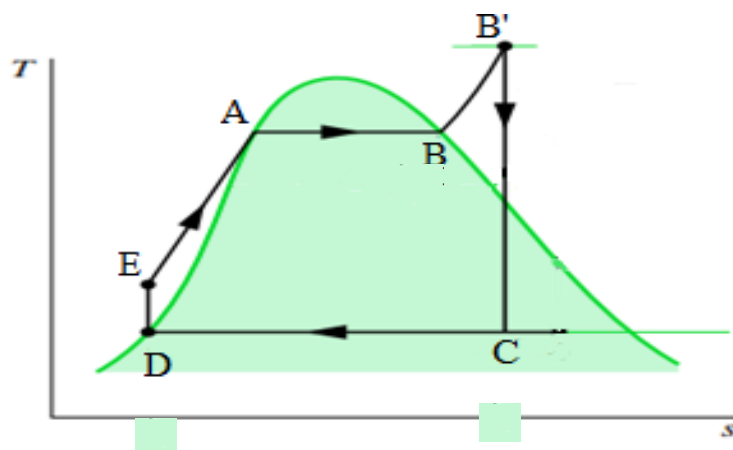


Figure II. 6 : Cycle de Hirn sur un diagramme (T, S) [13].

- D- E compressions d'eau dans la pompe, passage de base pression à haut pression.
- E-A-B chauffage isobare et évaporation isobare et isotherme dans le générateur de vapeur.
- B-B' chauffage isobare de la vapeur.
- B'-C détente adiabatique irréversible, de haut pression à base pression dans la turbine.
- C- D condensations isobare et isotherme du mélange jusqu'à eau liquide [15].

Ce cycle à vapeur surchauffée possède deux avantages essentiels par rapport au cycle de base de Rankine :

- la surchauffe augmente la température d'utilisation d'une partie de la chaleur de la source chaude.
- la surchauffe permet d'effectuer un cycle sec (il n'y a pas de vapeur humide dans la machine motrice) si la surchauffe a été choisie de telle sorte qu'en fin de détente on se trouve sur la courbe de vapeur saturante à la température du condenseur [16].

### II.3.2. Le cycle à vapeur resurchauffée

Pour augmenter à nouveau la puissance de l'installation sans augmenter le débit de vapeur (et donc sa taille globale et le coût de la chaudière), il est possible de chauffer une deuxième fois la vapeur avant sa sortie de la turbine C'est ce que l'on appelle la resurchauffe.

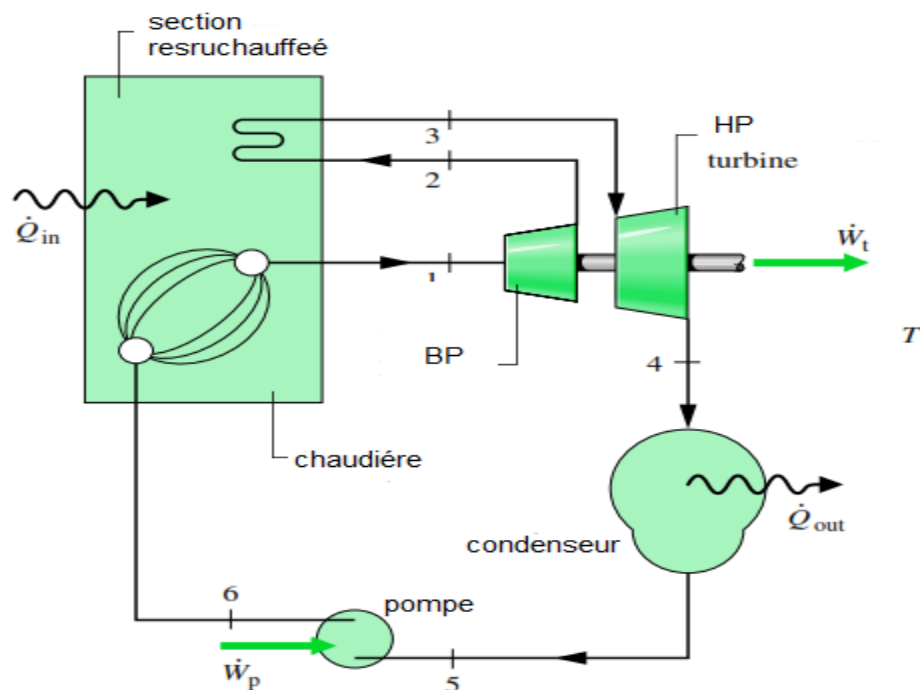
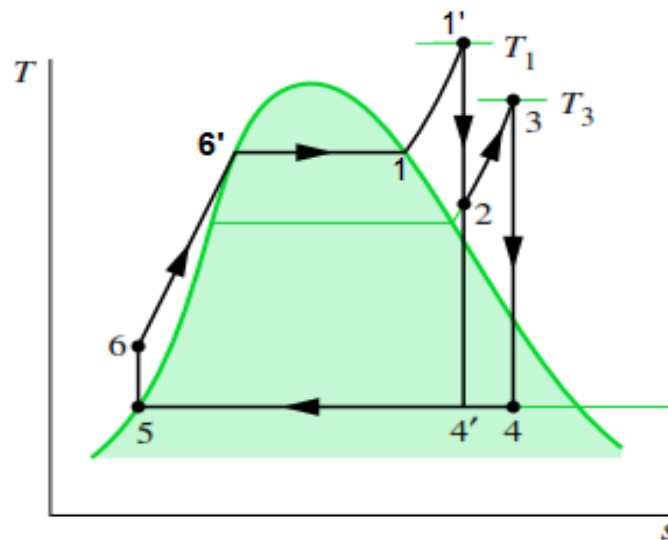


Figure II. 7 : schéma d'une installation motrice à vapeur resurchauffée [13].

La vapeur en sortie de la surchauffeur est envoyée pour détente partielle dans une première turbine. En sortie de cette turbine, les vapeurs sont resurchauffées avant d'être envoyées dans la seconde turbine dans laquelle la détente totale a lieu. Une telle installation permet d'effectuer un cycle sec avec une température de surchauffe moins élevée qu'avec un cycle à simple surchauffe. La différence importante avec les deux cycles précédents est que ce n'est plus un cycle à deux pressions mais un cycle à trois pressions (une BP, une HP et une pression intermédiaire).



**Figure II. 8 : Le cycle à vapeur resurchauffée sur un diagramme (T, S) [13].**

- 5-6 compressions d'eau dans la pompe, passage de base pression à haute pression (BP à HP).
- 6-6'-1 chauffage isobare et évaporation isobare et isotherme dans le générateur de vapeur.
- 1-1' chauffage isobare de la vapeur.
- 1'-2 1<sup>ère</sup> détente adiabatique de haute pression à la pression intermédiaire (HP à MP).
- 2-3 chauffages isobares de la vapeur.
- 3-4 une 2<sup>ème</sup> détente adiabatique, de la pression intermédiaire à base pression (MP à BP)

Dans la turbine.

- 4-5 condensation isobare et isotherme du mélange jusqu'à eau liquide [13].

Les avantages d'une telle installation à vapeur resurchauffée, sont les suivants :

- Il est plus facile de cette façon d'obtenir un point final dans la zone de vapeur surchauffée ce qui garantit la longévité de la turbine D'autre part, le travail récupéré est plus important, ce qui augmente la puissance récupérée pour le même débit de vapeur.
- Le rendement peut être amélioré dans certains cas, Ces avantages sont obtenus au prix d'une plus grande complexité de l'installation et d'un prix plus élevé.



- La vapeur est conduite dans une nouvelle série de tubes pour porter à nouveau sa température à haute température (usuellement aux limites métallurgiques de la turbine). La détente est alors complétée jusqu'à la pression du condenseur.
- Le rendement global de l'installation est augmenté si la température moyenne de chauffage l'est aussi ; il faut donc choisir avec soin la pression de la resurchauffe.
- La consommation spécifique, elle est diminuée dans tous les cas, avec les avenages décrites plus haut.
- l'augmentation de la pression maximum est favorable à l'efficacité du cycle de Rankine-Hirn, mais qu'elle entraîne une augmentation de la teneur en eau à l'échappement. On évite ce problème en procédant à une ou plusieurs resurchauffes [14].

### II.3.3. Les cycles à vapeur à régénération

L'amélioration du rendement exige de se rapprocher le plus possible d'un cycle de Carnot, dans lequel les échanges de chaleur avec les sources extérieures s'effectuent au cours des transformations isothermes. On cherche donc, pour les transformations non-isothermes, à générer des transferts de chaleur à l'aide d'échangeurs internes. Ces échanges de chaleur internes ne modifient pas le rendement de Carnot. En effet, si les deux quantités de chaleur peuvent être échangées à l'intérieur du cycle sans faire appel aux sources extérieures alors, les seuls échanges de chaleur avec les sources de chaleur sont des échanges isothermes, et l'on obtient un cycle de Carnot.

Le principe des cycles à régénération consiste à prélever de la chaleur au fluide de travail lors de sa détente et à utiliser cette chaleur pour le préchauffage du liquide à sa sortie du condenseur.

Pour s'approcher d'un cycle idéal, on effectue des soutirages de vapeur, chaque soutirage prélève de la vapeur chaude que l'on dirige vers un réchauffeur dans lequel rentre également l'eau liquide qui vient du condenseur et se dirige vers le générateur de vapeur, la vapeur se condense et cède sa chaleur de condensation à l'eau qui s'échauffe. Avec plusieurs réchauffeurs en cascade, on peut ainsi s'approcher d'un cycle idéal à régénération. Il existe plusieurs façons d'effectuer la régénération [3], nous allons en citer deux.

#### II.3.3.1. Cycle de régénération par échange à contact indirect :

Cette solution consiste à prélever, au cours de la détente dans la turbine et à différents niveaux de température judicieusement choisis, des débits convenables de vapeur et à les faire se condenser sur des tubes parcourus successivement d'étage en étage par le liquide

HP à réchauffer.

Avec cette solution, tout le fluide de travail circule dans le condenseur et dans le générateur de vapeur.

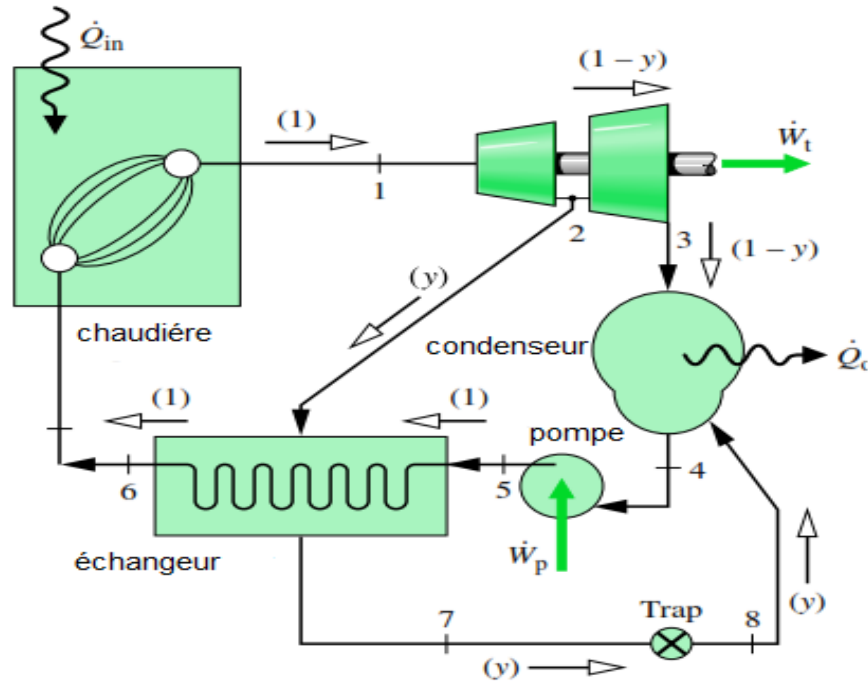


Figure II. 9 : Schéma d'une machine motrice à vapeur à soutirage avec réchauffeur [13].

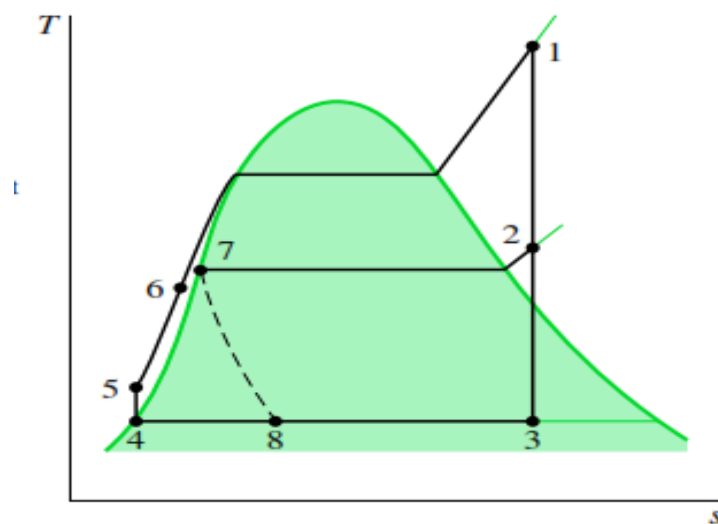


Figure II. 10 : Cycle idéal à soutirage avec régénérateur à contact indirect dans un diagramme (T, S) [13].

II.3.3.2. Cycle de régénération par échange à contact direct :

Cette solution consiste à condenser la vapeur en cours de détente directement sur la fluide thermodynamique à l'état liquide en cours de chauffage. À chaque étage, on a donc

une partie de la vapeur qui sort de la turbine pour aller en un point du circuit au-delà du condenseur sans passer par le condenseur.

Le bilan de masse est totalement modifié par rapport au cas précédent puisque maintenant le débit massique dans le générateur n'est plus égal au débit massique dans le condenseur. D'autre part, le bilan enthalpique est également excessivement différent de celui de l'échange à contact indirect. L'échange de chaleur provient non pas d'un prélèvement d'enthalpie sur la vapeur en cours de détente mais d'un prélèvement de vapeur. Contrairement au cas précédent du soutirage, la chaleur n'est plus extraite sur le fluide mais c'est du fluide qui est extrait [13].

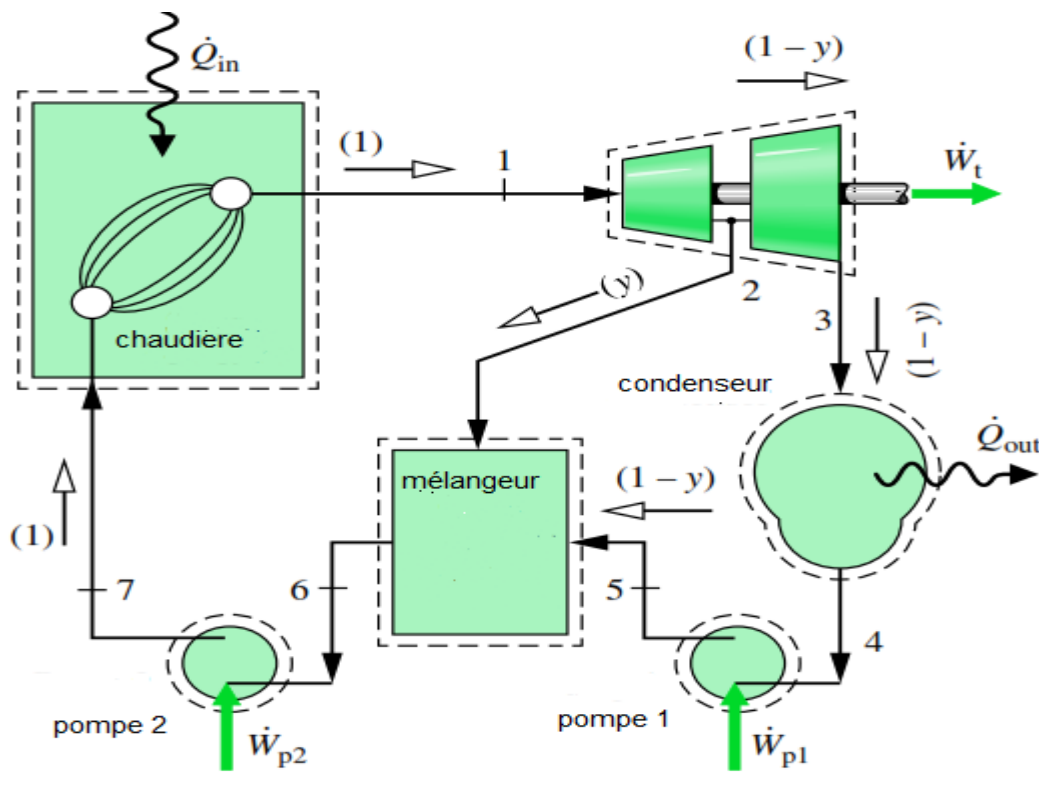


Figure II. 11 : Schéma d'une machine motrice à vapeur à soutirage avec réchauffeur [13].

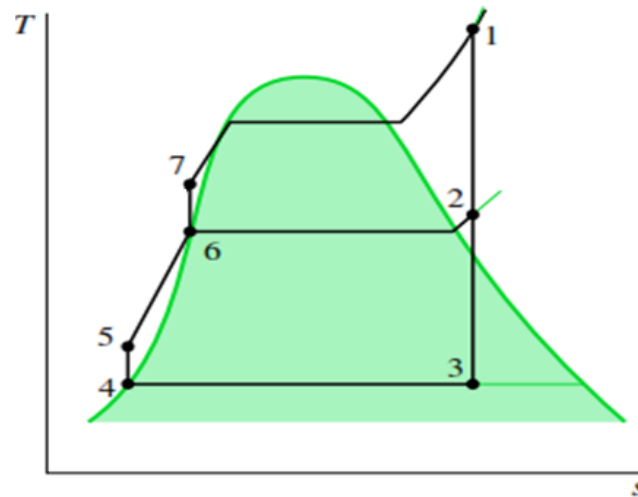


Figure II. 12 : Cycle idéal à soutirage avec régénérateur à contact direct dans un diagramme (T,S) [13].

### II.3.4.Cycle combiné

La combinaison entre le cycle vapeur et gaz permettent d'augmenter l'efficacité de l'installation. L'énergie contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz est récupérée dans une chaudière en faisant passer successivement dans les trois échangeurs suivants : l'économiseur qui a pour fonction l'augmentation de la température de l'eau à la température de saturation qui correspond à la pression de l'eau à la sortie de la pompe, l'évaporateur dans lequel l'eau à l'état liquide saturée est vaporisée et en fin le surchauffeur ou la vapeur d'eau qui sort de l'évaporateur à température de saturation est surchauffée jusqu'à atteindre une température limite au-dessus de laquelle la bonne tenue des matériaux de la chaudière est effectuée, la vapeur surchauffée se détend ensuite dans une turbine pour produire de l'énergie mécanique [17].

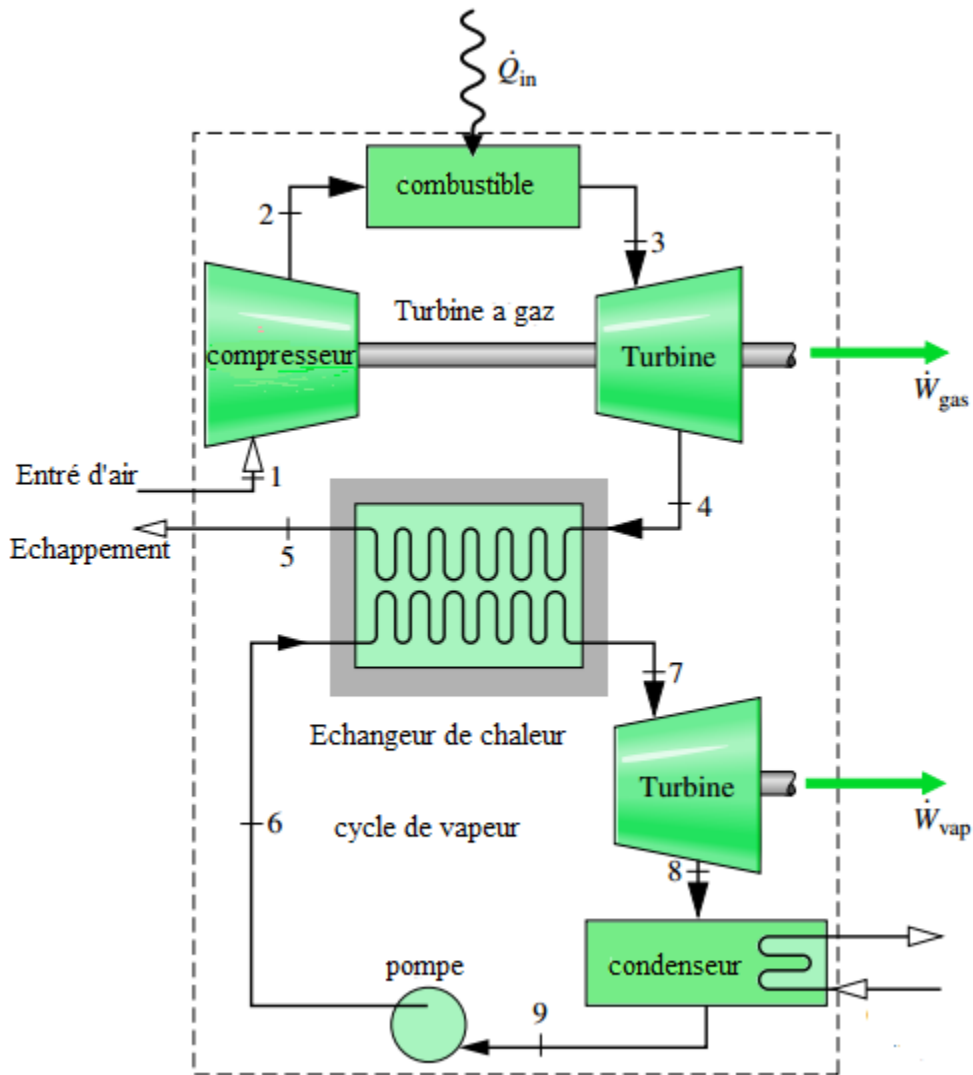


Figure II. 13 : schéma d'une installation combinée d'une turbine à gaz-cycle vapeur [13].

### II.3.5. Le cycle supercritique à vapeur

La recherche de rendements plus élevés a conduit à utiliser des températures de sources chaudes de plus en plus élevées. Les améliorations de résistance des matériaux permettent d'augmenter d'une part les températures et d'autre part les pressions de fonctionnement. C'est ainsi que des cycles supercritiques ont été testés (Figure II.14). Dans un tel cycle, il n'y a plus de changement de phase dans le réchauffeur : il y a contournement du point critique [13].

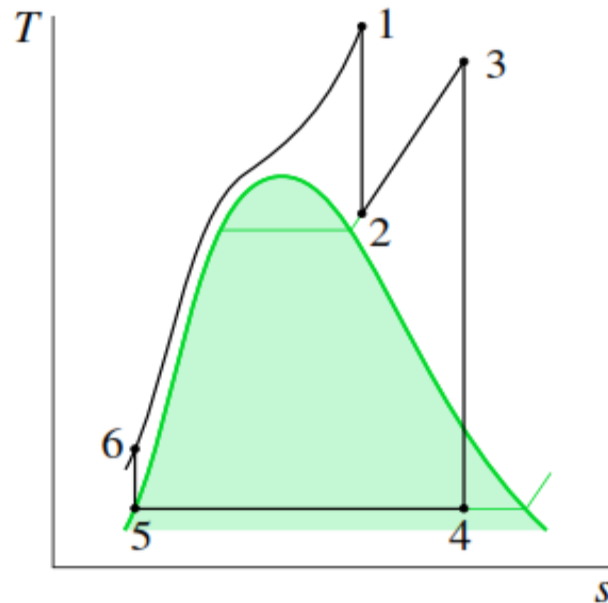


Figure II. 14 : Cycle supercritique [13].

### II.3.6. Cycle de vapeur binaire

L'eau est le caloporteur le plus populaire dans les cycles de puissance à vapeur mais s'il existe d'autre caloporteur avec une température critique élevée et une pression maximale sécuritaire lorsque la température critique du caloporteur est supérieure à la limite métallurgique permise, la chaleur peut être transmise au caloporteur de façon isothermique, le cycle peut alors s'approcher du cycle Carnot.

Un cycle binaire est un cycle qui utilise deux boucles de fluide caloporteur différent dans le but d'élargir l'écart de température entre les réservoirs thermiques et par conséquent d'augmenter le rendement thermique [13].

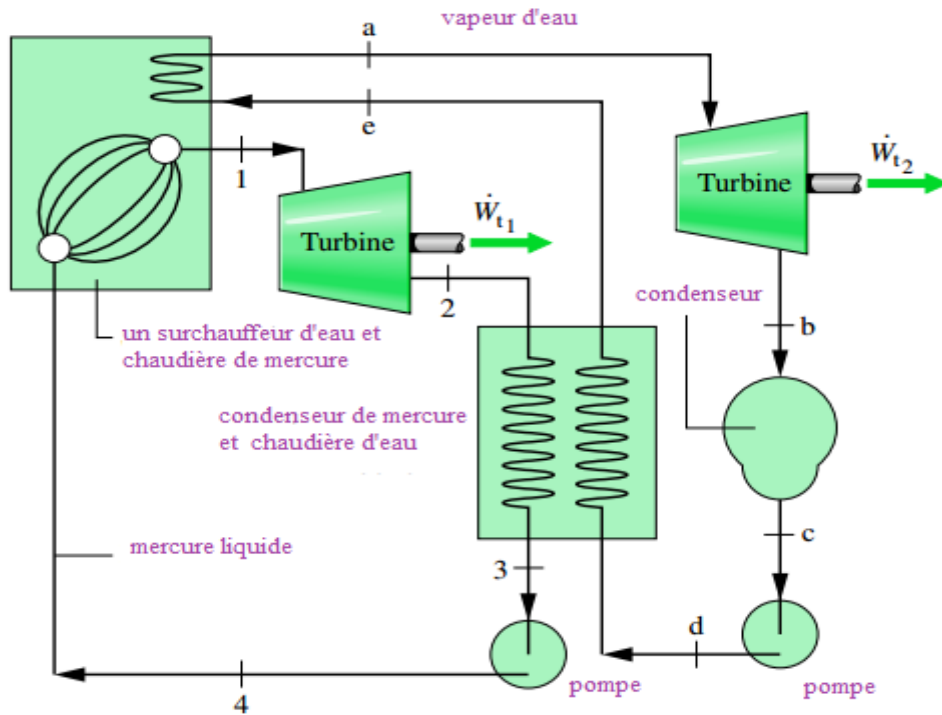


Figure II. 15 : schéma d'une installation motrice d'un cycle binaire (eau-mercure) [13].

Le mercure c'est le seul métal à l'état liquide est caloporteur adapté pour le cycle a haute température, son point critique est de 898 C° est sa pression critique n'est que 18 MPa. la figure (II-15 ) exprime un schéma du cycle binaire mercure-eau, le mercure est utilisé dans le cycle a haute température et la vapeur d'eau a basse température .le puits de chaleur du cycle à mercure est la source de chaleur du cycle à vapeur d'eau[18].

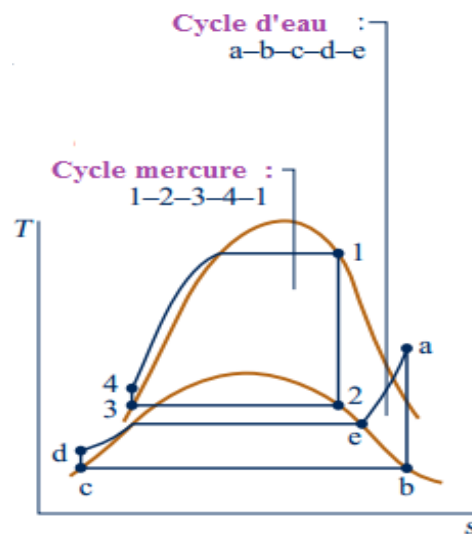


Figure II. 16 : Cycle eau-mercure [13].

## II.4. les pertes d'un cycle de Rankine

### II.4.1. Pertes dans la turbine et dans la pompe

Il s'agit essentiellement de pertes par dissipation visqueuse, que l'on peut caractériser par les rendements isentropiques respectifs [10].

$$\eta_t = \frac{W_t}{h_1 - h_{2s}}$$

$$\eta_p = \frac{h_{4s} - h_3}{W_p}$$

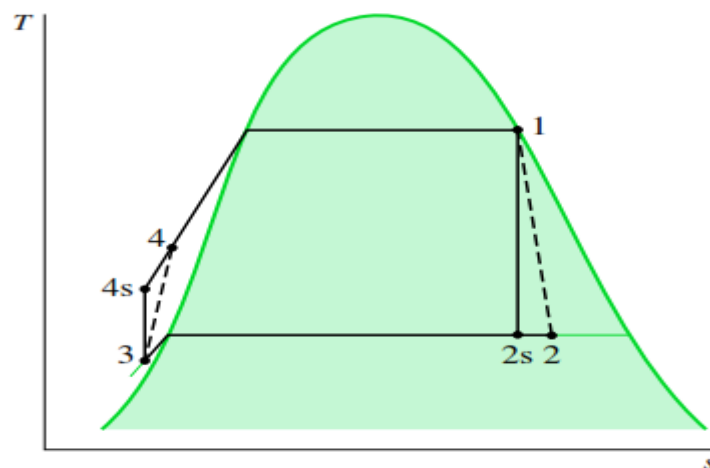


Figure II. 17 : schéma explicatif des Pertes dans la turbine et dans la pompe dans un digramme (T, S) [13].



# **Chapitre III :**

# **Calcul Théorique**

### III.1. La notion de système

La thermodynamique étudie des systèmes. Un système est une portion de l'Univers que l'on isole par la pensée et tout ce qui est hors de ce système est appelé milieu extérieur. Il existe Trois types de systèmes :

- Les systèmes ouverts qui échangent de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur.
- Les systèmes fermés qui n'échangent pas de matière avec le milieu extérieur mais qui peuvent échanger de l'énergie sous forme de travail mécanique et de chaleur.
- Les systèmes isolés où il n'y a aucun échange avec le milieu extérieur (ni matière, ni Énergie). Ex : une bouteille thermos fermée idéale rigide.

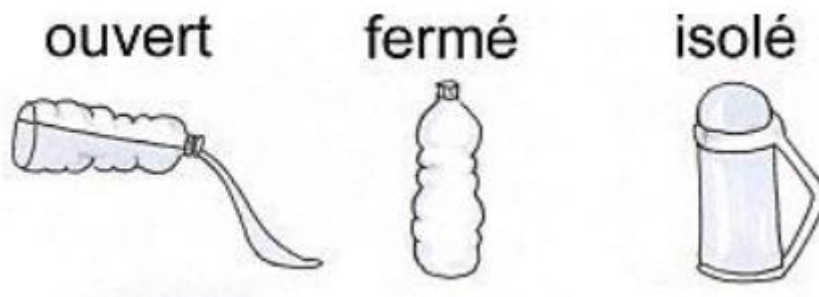


Figure III. 1: schéma explicatif des systèmes thermodynamiques.

### III.2. Les variables d'état

Différentes grandeurs (ou variables) physiques sont utilisées en thermodynamique. Il est primordial de bien les comprendre et de pouvoir les classer dans différentes catégories pour ensuite les utiliser. Tout d'abord, il faut distinguer les grandeurs extensives et intensives :

**Une grandeur extensive** : est une grandeur physique qui est proportionnelle à la taille du Système (on peut les additionner). Ex : masse, volume, quantité de matière, etc.

**Une grandeur intensive** : est une grandeur physique qui ne dépend pas de la quantité de Matière considérée (on ne peut pas les additionner).

Ex : température, pression, densité, etc. [19].

### III.3. Le premier principe de la thermodynamique (principe de conservation de l'énergie)

Il repose sur deux concepts fondamentaux :

- L'équivalence entre le travail et la chaleur à raison de 1cal pour 4,18 joules de travail effectué.
- La loi de la conservation de l'énergie (ni création ni destruction d'énergie). C'est pourquoi on l'appelle aussi principe de la conservation de l'énergie.

Le bilan thermodynamique des échanges entre le système et le milieu extérieur demeure constant quelle que soit le type de la transformation qui conduit le système du même état initial au même état final.

Dans le cas général où des formes d'énergies peuvent exister, on fait allusion à l'énergie électrostatique, électromagnétique ou chimique en dehors des transformations mécaniques qui tiennent compte de la température et des paramètres mécaniques (P, V), le bilan thermodynamique devient,

$$\Delta U = Q - W \quad (\text{III-1})$$

Pour une transformation cyclique, l'énergie interne du système reste constante et sa variation est nulle:

$$\oint du = 0 \quad (\text{III-2})$$

L'énergie interne est une fonction d'état. Sa variation infinitésimale s'interprète par le différentiel. Le travail et la chaleur ne sont pas des fonctions d'état.

#### III.3.1. L'énergie totale d'un système fermé

A tout système est associée une fonction d'état U appelée énergie interne. Au cours d'une transformation d'un état i à un état f, la variation d'énergie interne est une grandeur extensive et conservative tel que :

$$E_T = \Delta U + \Delta E_P + \Delta E_C \quad (\text{III-3})$$

Cette énergie est dépend de la position, le mouvement et de la nature du système.

**III. 3.1.1. L'énergie interne**

L'énergie interne  $U$  est associée aux mouvements à l'échelle microscopique et aux interactions entre les particules microscopiques internes tel que :

$$\Delta U = W - Q \quad (\text{III-4})$$

$W$  : travail mécanique et  $Q$  : quantité de chaleur reçus par le Système ( $Q > 0$ ).

C'est le principe de conservation de l'énergie, Si le contenu d'énergie  $\Delta U$  d'un système augmente, il faut que cette énergie soit puisée dans le milieu extérieur.

**III. 3.1.2. L'énergie cinétique**

Au cours d'une transformation d'un système, d'un état initial à un état final, la variation de la fonction d'état ne dépend que des états définis par les variables d'état et non des étapes intermédiaires. La thermodynamique est l'étude des fonctions d'état.

La cinétique est une fonction d'état qui basée sur l'étude du chemin parcouru de corps tel que :

$$E_C = \frac{1}{2} m C^2 \quad (\text{III-5})$$

**III. 3.1.3. L'énergie potentielle**

C'est l'énergie qui généralement sera soumise aux seules forces de gravitation et liée à la position du système. [20]:

$$E_p = m g z \quad (\text{III-6})$$

$E_p$  l'énergie potentielle.

$z$  est l'altitude verticale du corps de masse  $m$

Si on limite les forces extérieures au seul champ de gravité, on écrit :

$$E_T = U + \frac{mv^2}{2} + m g z \quad (\text{III-7})$$

**III.3.2. Les transferts de l'énergie**

Le Transfert d'énergie se fait par deux types d'échange sous forme thermique (chaleur  $Q$ ) ou mécanique (travail  $W$ ).

**a) Transfert thermique par conduction**

Le phénomène de conduction est un mode de transfert thermique dans lequel l'énergie thermique est transmise de proche en proche, grâce aux chocs entre les particules (atomes, molécules, etc.) qui forment la matière. Cependant, la conduction n'entraîne pas de mouvement macroscopique de la matière.

**Remarque**

- La conduction a principalement lieu entre des corps solides.
- La conduction se fait de la source chaude vers la source froide.

**Propriété**

Le transfert thermique par conduction est **irréversible**. Cela signifie qu'il ne peut pas avoir lieu dans le "sens inverse" (de l'état final à l'état initial).

**b) Transfert thermique par convection**

Dans le transfert thermique par convection, l'énergie thermique est également transmise de proche en proche, mais cette fois avec mouvement d'ensemble de la matière. Le phénomène de convection a notamment lieu dans les fluides (corps liquides ou gazeux).

**c) Transfert thermique par rayonnement**

Dans le transfert thermique par rayonnement, c'est l'absorption ou l'émission de rayonnements qui modifie l'agitation thermique.

**Propriété**

Contrairement aux deux autres modes de transferts thermiques, le transfert thermique par rayonnement peut également avoir lieu dans le vide.

**III. 3.3. Le Travail**

Le travail mécanique du a une variation de volume, Conventionnellement Le travail reçu par un système est le travail des forces extérieures[3].

$$dW = P_{\text{ext}} dV \quad (dV > 0 \text{ le travail est fourni, } dV < 0 \text{ le travail est reçu}). \quad (\text{III-8})$$

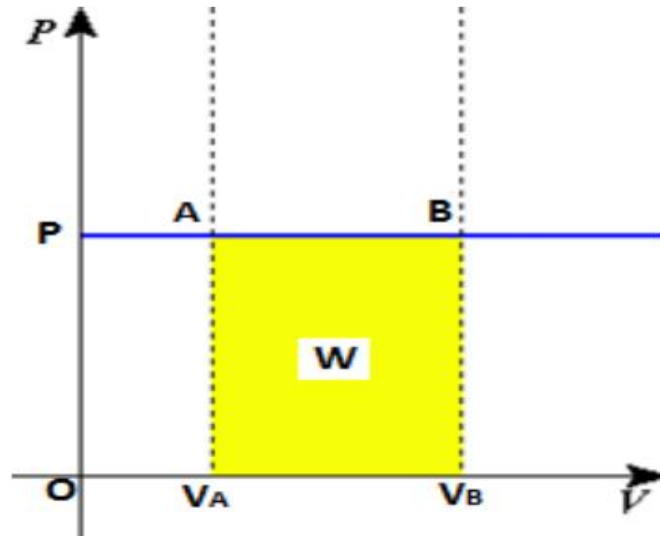


Figure III. 2 : travail fourni et reçu.

### III. 4. Énoncé du premier principe de la thermodynamique

U est une fonction d'état, elle ne dépend que de l'état initial et de l'état final. Cette propriété est connue sous le nom de "principe de l'état initial et de l'état final".  $\Delta U$  ne dépend que des états initial et final et  $dU$  est une différentielle exacte c'est à dire qu'on peut évaluer :

$\Delta U = U_f - U_i$  en connaissant seulement les limites d'intégration. ne peut pas être calculé en connaissant seulement les limites d'intégration, car l'intégrale dépend de la loi de variation :  $E_{T2} - E_{T1} = \sum_1^2 (\delta Q - \delta W)$  (III-9)

Lorsqu'un système subit une transformation fermée (cycle), la quantité de travail, qui est délivrée au milieu extérieure, est égale à la quantité de chaleur échangée

$$\oint_{\text{cycle}} \delta q = \oint_{\text{cycle}} \delta w \quad (\text{III-10})$$

#### III. 4.1. Equation de l'énergie pour un system fermée

Il a été énoncé par le physicien allemand Robert au régime stationné ( $\Delta E_c = 0$ ) et placé hors de tout champ de forces ( $\Delta E_p = 0$ ).

$$E_T = \Delta U = Q - W$$

U : énergie interne du système. [3].

### III. 4.2. Equation de l'énergie pour un système ouvert

Dans le cas d'un système ouvert le fluide est en mouvement. Il faut donc tenir compte de l'énergie cinétique du fluide.

Considérons le système ouvert suivant :

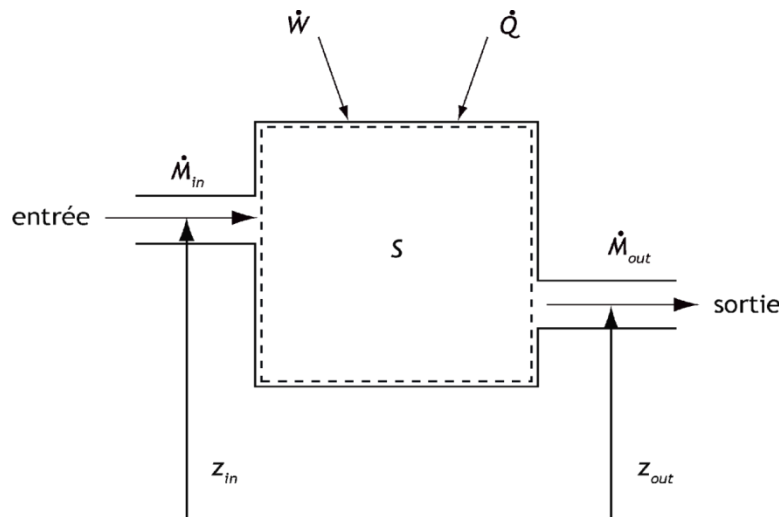


Figure III. 3 : Schéma d'un système ouvert.

L'équation de l'énergie pour en régime transitoire s'écrit:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in} \left( u_{in} + \frac{C_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) - \dot{m}_{out} \left( u_{out} + \frac{C_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \quad (\text{III-11})$$

Maintenant pour un régime permanent où le flux massique ne varie pas par rapport au temps, ( $\Sigma \dot{m}_{out} = \Sigma \dot{m}_{in}$ ), alors que :

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0 \quad (\text{III-12})$$

Par simplification, le premier principe pour un régime permanent devient : [21]

$$\frac{q}{m} - \frac{w}{m} + (h_{in} - h_{out}) + \frac{(C_{in}^2 - C_{out}^2)}{2} + g(z_{in} - z_{out}) = 0 \quad (\text{III-13})$$

## III.5. Application du 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique aux gaz parfaits

### III. 5.1. Les transformations thermodynamique

Une transformation est le passage d'un fluide d'un état à un autre. Le sens du mot "état" est ici très large. Un simple apport de chaleur met le fluide dans un autre état. Les changements d'état de la matière, vaporisation, condensation, sublimation, solidification,

fusion....ne sont que des cas particuliers de transformations dans lesquels certaines propriétés mécaniques changent. On distingue 5 types de transformations :

### III. 5. 1.1. Transformation isobare

Transformation isobare tant qu'on peut négliger les pertes de charge et les variations d'énergie cinétique. Une transformation isobare est une transformation où la pression est constante. Au cours de passage de l'état 1 à l'état 2.

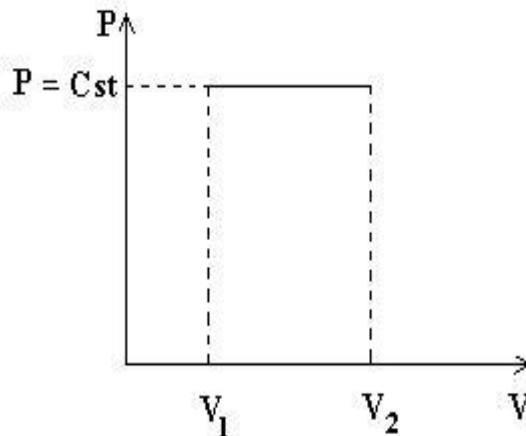


Figure III. 4 : Transformation isobare sur un diagramme (P, V).

D'après la Figure (III-4) :  $P = \text{const}$  donc :  $\frac{P}{T} = \text{const}$

Pour un état 1 à état 2 On a :

$$U_{12} = Q_{12} - W_{12}$$

$$U_{12} = m \cdot C_v \cdot \Delta T$$

$$Q_{12} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{III-14})$$

### III. 5.1. 2. Transformation isochore

Est une transformation durant laquelle le volume est constant, La variation d'énergie interne d'un système thermodynamique est égale à la quantité de chaleur échangée à volume constant.



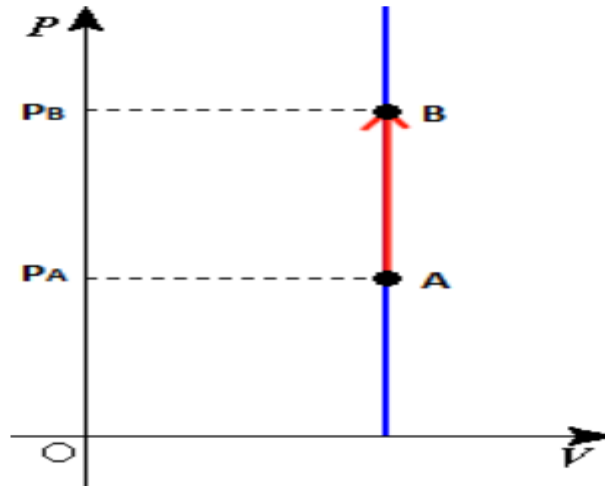


Figure III. 5 : Transformation isochore sur un diagramme (P, V).

D'après la Figure (III-5) :  $V = \text{const}$  donc :  $\frac{P}{T} = \text{const}$

Pour un état 1 à état 2 On a :

$$U_{12} = Q_{12} - W_{12}$$

$$Q_{12} = m \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (\text{III-15})$$

$$W_{12} = 0 \quad (\text{III-16})$$

### III. 5.1. 3. Transformation isotherme

Est une transformation à laquelle la température est constante. Le changement de phase isobare d'un corps pur est également isotherme.

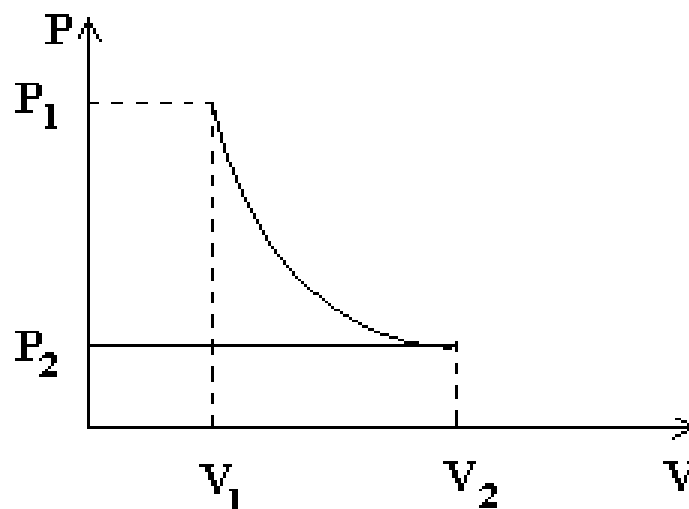


Figure III. 6 : Transformation isotherme sur un diagramme (P, V).

D'après la Figure (III-6) :  $T = \text{const}$  donc :  $PV = \text{const}$

Pour un état 1 à état 2 On a :

$$U_{12} = Q_{12} - W_{12}$$

$$U_{12} = m \cdot C_v \cdot T_{12} = 0$$

$$W_{12} = Q_{12} = mrT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{III-17})$$

#### III. 5.1. 4. Transformation adiabatique

Dans cette transformation il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur. Les transformations adiabatiques ne sont évidemment pas nécessairement isothermes.

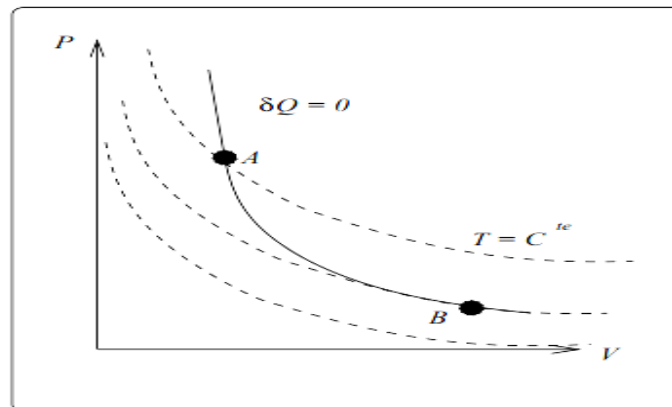


Figure III. 7 : Transformation adiabatique sur un diagramme (P, V).

D'après la Figure (III-7) :  $Q_{12} = 0$  donc :  $P V^\gamma = \text{const}$

Pour un état 1 à état 2 On a :

$$U_{12} = -W_{12} \quad (\text{III-18})$$

$$U_{12} = m \cdot C_v \cdot T_{12} \quad (\text{III-19})$$

#### III. 5.1. 5. Transformation poly tropique

Une transformation appliquée à un gaz (en général considéré comme un gaz parfait) et ce transformation vérifier la loi  $P V^k = \text{const}$  [3]

Cas particuliers :  $\Delta Q \neq 0$ , si  $k = 1$  la transformation devienne : isotherme.

On définit Les coefficients calorimétriques  $C_p$  et  $C_v$

$$C_v = \frac{du}{dT} \quad C_p = \frac{dh}{dT} \quad (\text{III-20})$$

### III.6. Le deuxième principe de la thermodynamique

Insuffisance du 1<sup>er</sup> principe, le premier principe prévoit la conversion de la chaleur en travail mais de façon continue. Il s'intéresse donc au bilan énergétique échangé entre le système et le milieu extérieur. En réalité on ne peut pas construire une machine qui donne que du travail mécanique et qui échange de la chaleur avec une source unique. Une source froide est indispensable.

Le premier principe ne peut pas prévoir le sens de la transformation et n'explique pas les transformations spontanées. Les processus physiques qui s'orientent vers un sens bien déterminé. Un système qui évolue naturellement ne peut de lui-même reprendre son état initial.

L'état exprimé par le gaz ou la vapeur présente un état de désordre supérieur. Par la thermodynamique on explique la tendance vers un désordre moléculaire et on décrit la direction des processus physiques et chimiques. Tel est la signification du 2<sup>ème</sup> principe.

Exemples :

- L'explosion d'une bombe.
- La combustion d'une allumette.

Le 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique considère que les transformations naturelles sont spontanées et donc irréversibles.

#### III. 6. 1. L'entropie

La variation de l'énergie interne est déterminée directement à partir du travail et de la chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur. La variation de l'entropie par contre ne peut être déterminée qu'à partir de la quantité de chaleur échangée au cours d'une transformation réversible.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q_{\text{réversible}}}{T} \quad (\text{III-21})$$

$\Delta Q_{\text{réversible}}$  : C'est la quantité de chaleur réversible (J), T c'est la température(K) et  $\Delta S$  l'entropie (J/K).

### III. 6. 2. Evolutions réversibles et irréversibles

L'irréversibilité des transformations est causée par les frottements dus au mouvement relatif d'une partie du fluide par rapport à une autre ou aux frontières solides de l'enceinte en raison de la nature visqueuse du fluide, et à l'échange de chaleur avec le milieu extérieur à travers une différence de température finie.

### III. 6. 3. Énoncé du deuxième principe de la thermodynamique

Le deuxième principe de la thermodynamique caractérisé par la fonction d'état S appelée entropie. Cette fonction ne peut qu'augmenter pour un système isolé et fermé. La fonction entropie vérifie l'identité thermodynamique suivante :

Le 2<sup>ème</sup> principe énonce que pour une transformation quelconque, l'entropie totale ne peut

J amis décroître. [21]

$$\Delta S_{\text{total}} \geq 0$$

Avec :

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{système}} + \Delta S_{\text{milieu extérieur}} \quad (\text{III-22})$$

$$\text{Pour un processus adiabatique réversible : } \Delta S_{\text{total}} = 0 \quad (\text{III-23})$$

### III.7. Calcul de cycle de Rankine surchauffé

Considérons un cycle de Rankine surchauffé comme le suivant :

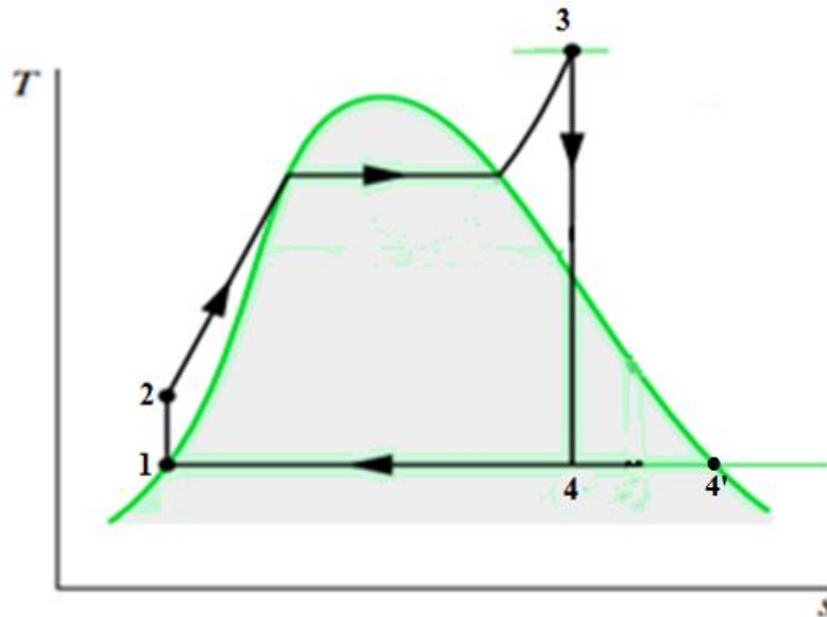


Figure III. 8 : Cycle de Rankine surchauffé sur un diagramme T-S [13].

Pour chaque élément de l'installation, on applique l'équation de l'énergie pour un écoulement stationnaire.

$$Q - W = \Delta h \quad \text{avec} \quad \Delta E_c + \Delta E_p = 0$$

#### a) La pompe

$$q_{12} - w_{12} = (h_2 - h_1) \quad (\text{III.24})$$

calcul de  $h_2$  :

$$dH = TdS + Vdp \quad (\text{III.25})$$

Pour une transformation isentropique de 1 à 2

$$TdS=0$$

$$h_2 - h_1 = v_1 (p_2 - p_1) \quad (\text{III.26})$$

$$h_2 = v_1 (p_2 - p_1) + h_1$$

Si on prend en considération qu'il n'y a pas échange de chaleur dans la pompe on obtient :

$$w_{12} = (h_1 - h_2) \quad (\text{III.27})$$

$$-w_{12} = v(p_2 - p_1)$$

Le travail de la pompe est un travail reçu au système donc :  $w_{12} < 0$

**b) La chaudière**

$$q_{23} - w_{23} = (h_3 - h_2) \quad (\text{III.28})$$

Si on prend en considération qu'il n'y a pas échange de travail dans la chaudière on obtient :

$$q_{23} = (h_3 - h_2) \quad (\text{III.29})$$

**c) La turbine**

$$q_{34} - w_{34} = (h_3 - h_4) \quad (\text{III.30})$$

Le titre de vapeur :  $x = \frac{h_4 - h_1}{h_4' - h_1} \quad (\text{III.31})$

$$h_4 = x(h_4' - h_1) + h_1$$

Si on prend en considération qu'il n'y a pas échange de chaleur dans la turbine, on obtient :

$$w_{34} = (h_3 - h_4) \quad (\text{III.32})$$

Le travail de la turbine est un travail cédé par le système, donc :  $w_{34} > 0$

**d) Le condenseur**

$$q_{41} - w_{41} = (h_1 - h_4) \quad (\text{III.33})$$

Si on prend en considération qu'il n'y a pas d'échange de travail dans le condenseur, on obtient :

$$q_{41} = (h_1 - h_4) \quad (\text{III.34})$$

On détermine l'efficacité d'une installation thermique en calculant son rendement thermique

$$\eta_{th} = \frac{\text{Travail net fourni par l'installation}}{\text{Quantité de chaleur fournie à l'installation}} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

$$W_{net} = W_p + W_t \quad (III.35)$$

Avec  $W_p$  c'est le travail de la pompe et  $W_t$  est le travail de la turbine.

$$\eta_{th} = \frac{w_p + w_t}{q_{in}} = \frac{w_{12} + w_{45}}{q_{24}} = \frac{h_4 - h_5 + h_1 - h_2}{h_4 - h_2} \quad [8] \quad (III.36)$$

### III.8. Le cycle de Rankine réel

Le fonctionnement réel s'écarte de fonctionnement idéal à cause des irréversibilités et des pertes thermiques. On chiffre cet écart par un paramètre appelé rendement isentropique, dont la définition varie selon que l'appareil considéré est moteur ou récepteur.

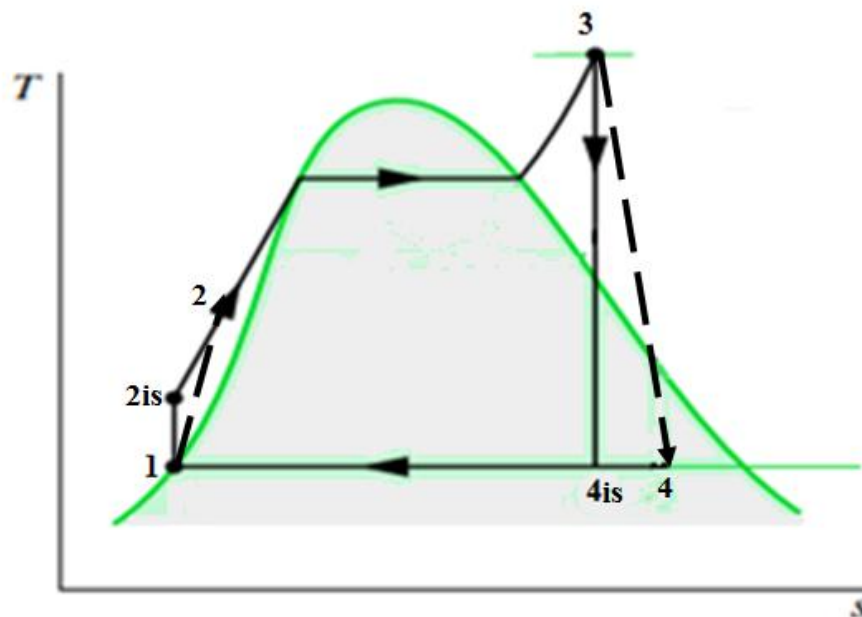


Figure III. 9 : schéma explicite l'écart entre un cycle de Rankine réel et un cycle idéal [13].

- Pour une turbine, on a :

$$\eta_{ist} = \frac{\text{travail real}}{\text{travail ideal}} = \frac{W_t}{h_4 - h_{4is}} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{4is}} \quad (III.37)$$

- Pour une pompe, on a :

$$\eta_{isp} = \frac{\text{travail ideal isentropique}}{\text{travail real récupéré}} = \frac{h_{2is}-h_1}{W_p} = \frac{h_{2is}-h_1}{h_2-h_1} \quad (\text{III.38})$$

### III.9. la consommation spécifique à vapeur :

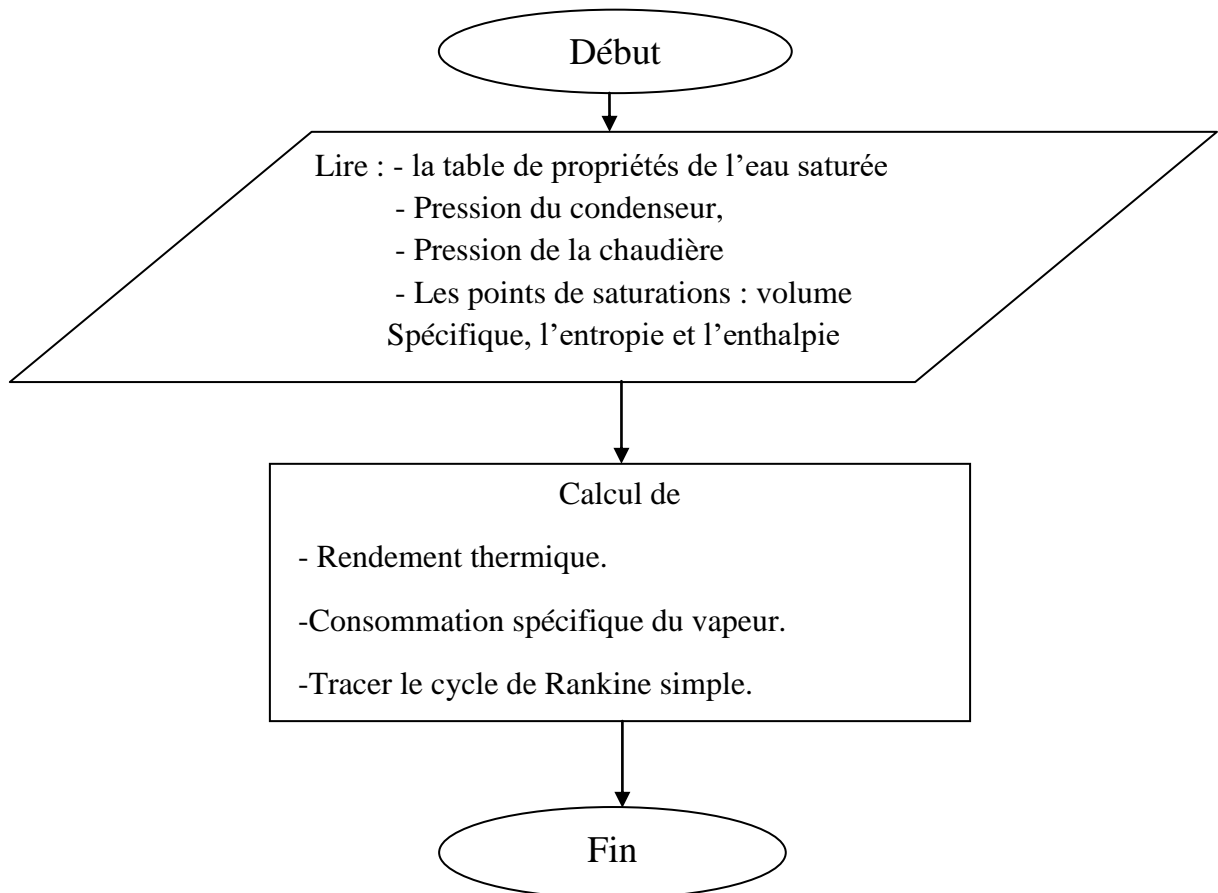
$$C_{sv} = \frac{\text{debit massique de vapeur}}{\text{puissance utile de l'installation}} = \frac{3600}{W_{net}} \quad [8] \quad (\text{III.39})$$



**Chapitre IV :**  
**Programme de Calcul**  
**et Résultat**

### IV .1.Programme de calcul pour l'installation thermique à vapeur simple :

Dans le but d'élaborer un programme avec MATLAB, qui sert comme outil d'aide à l'étude de cycle de Rankine simple, nous avons suivi l'organigramme suivant :



L'exécution du programme avec une pression dans le condenseur de 1 bar et pression dans la chaudière de 200 bar donne :

```

- x=(s4-s4f)/(s4g-s4f);
- h4=(x*(hg-hf))+hf;
- %w12:le travail de la pompe
w12=h1-h2;
- %q23:la quantite de chaleur de chaudière
q23=h3-h2;
- %w34:le travail de la turbine
w34=h3-h4;
- %q41:la quantite de chaleur de condenseur
q41=h1-h4;
- %wnet:le travail net
wnet=w12+w34;
- %nth:le rendement thermique
nth=(wnet/(q23))*100
- disp(['le rendement de cycle simple egal: ' num2str(nth) '.%'])
- %csv:la consommation spécifique de vapeur
csv=w1/wnet
- disp(['la consommation spécifique du vapeur: ' num2str(csv) '.kg/kw*h'])

entree Pmaxs200
entree Pmin1

nth =

    31.4759

le rendement de cycle simple egal: 31.4759.%

csv =

    5.7964

la consommation spécifique du vapeur: 5.7964.kg/kw*h

```

Figure IV. 1 : La fenêtre de MATLAB input pour simple.

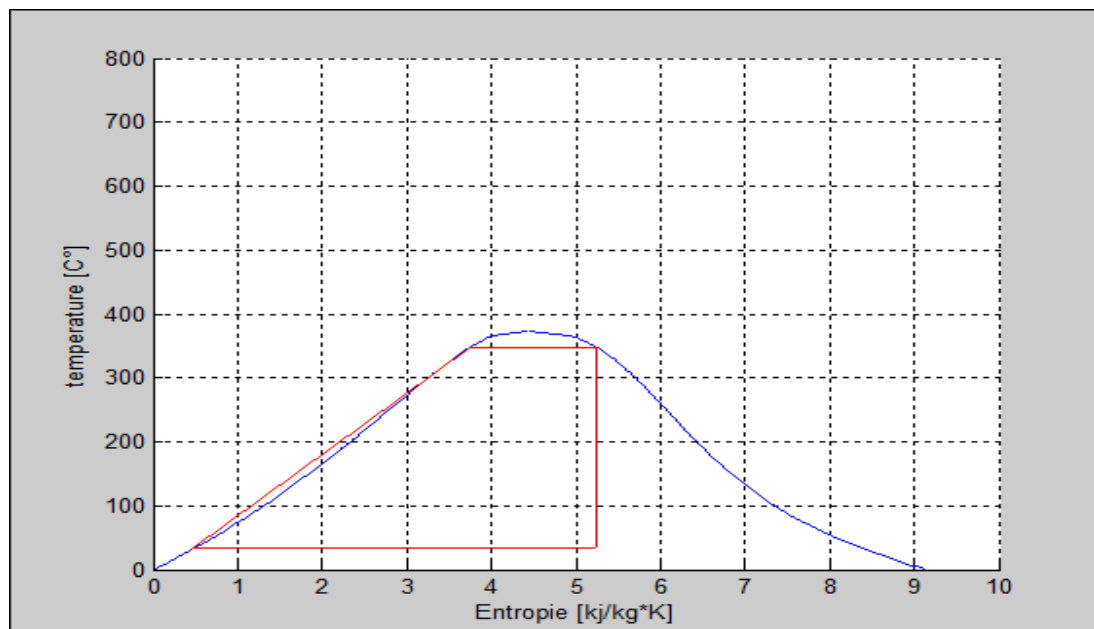
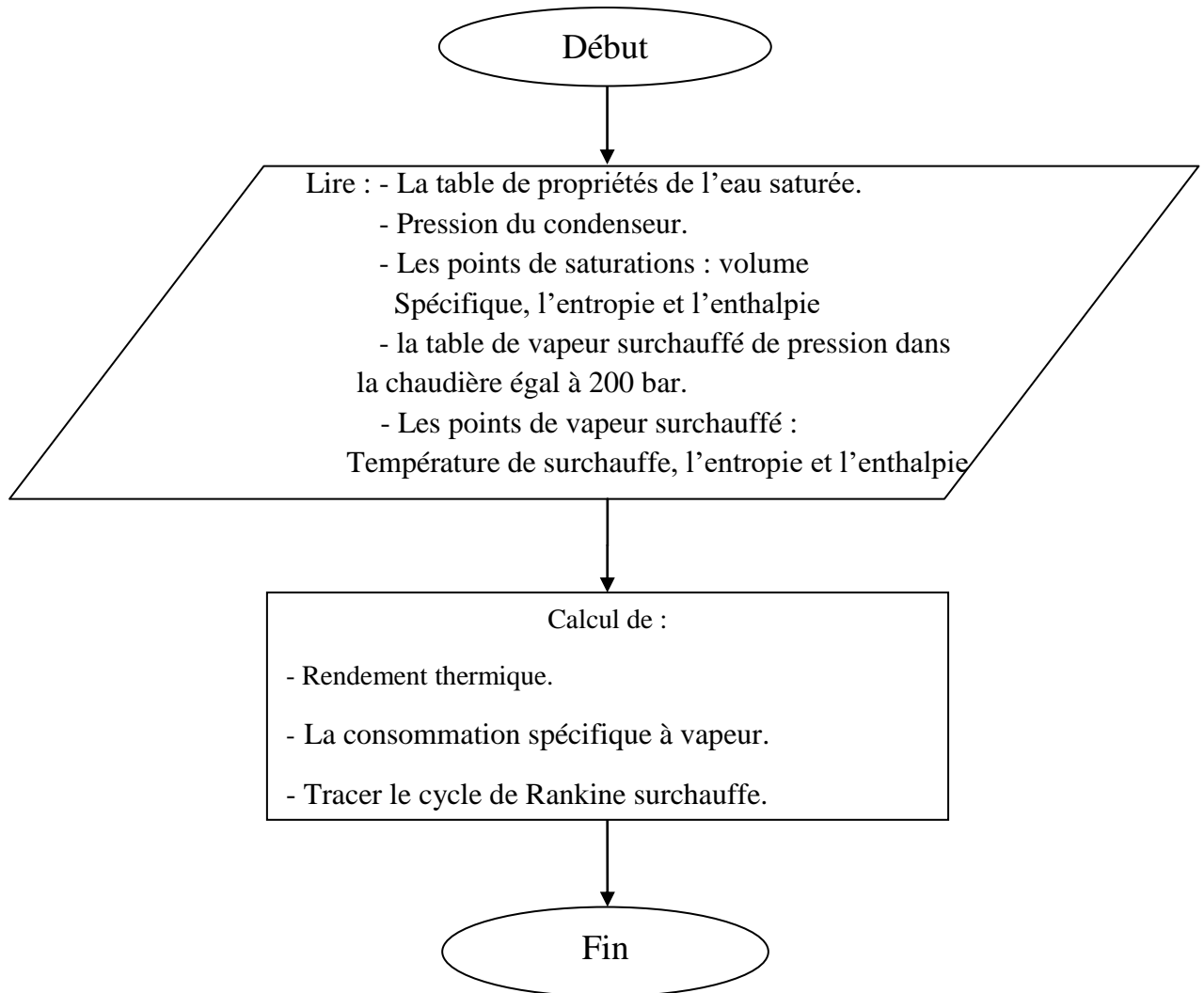


Figure IV. 2 : Cycle de Rankine simple sur MATLAB.

## IV.2. Programme de calcul du l'installation thermique à vapeur avec surchauffe :

Nous avons suivi l'organigramme suivant :



L'exécution du programme avec une pression dans le condenseur de 1 bar et pression dans la chaudière de 200 bar et température de surchauffe de 800 °C donne :

```

%x:titre de vapeur
x=(s4-s4f)/(s4g-s4f);
h4=(x*(hg-hf))+hf;
%w12:le travail de la pompe
w12=h1-h2;
%q23:la quantite de chaleur de chaudière
q23=h3-h2;
%w34:le travail de la turbine
w34=h3-h4;
%q41:la quantite de chaleur de condenseur 2
q41=h1-h4;
qtot=q23+q41;
%wnet:le travail net
wnet=w12+w34
%nth:le rendement thermique
nth=(wnet/(q23))*100
disp(['le rendement de cycle surchauffe egal: ' num2str(nth) '.%'])
%csv:la consommation spécifique de vapeur
csv=1/wnet
disp(['la consommation spécifique du vapeur: ' num2str(csv) '.kg/kw*h'])

entrer Pmax200
entrer Pmin1
t800

wnet =

    1.4859e+003

nth =

    40.9381

le rendement de cycle surchauffe egal: 40.9381.%

csv =

    2.4228

la consommation spécifique du vapeur: 2.4228.kg/kw*h
>>

```

Figure IV. 3 : La fenêtre de MATLAB input pour surchauffe.

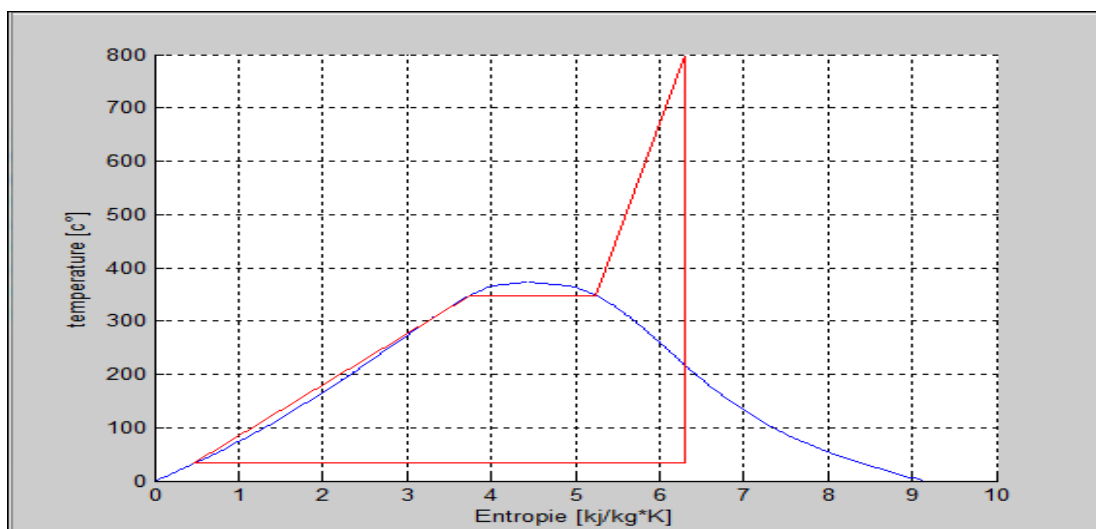


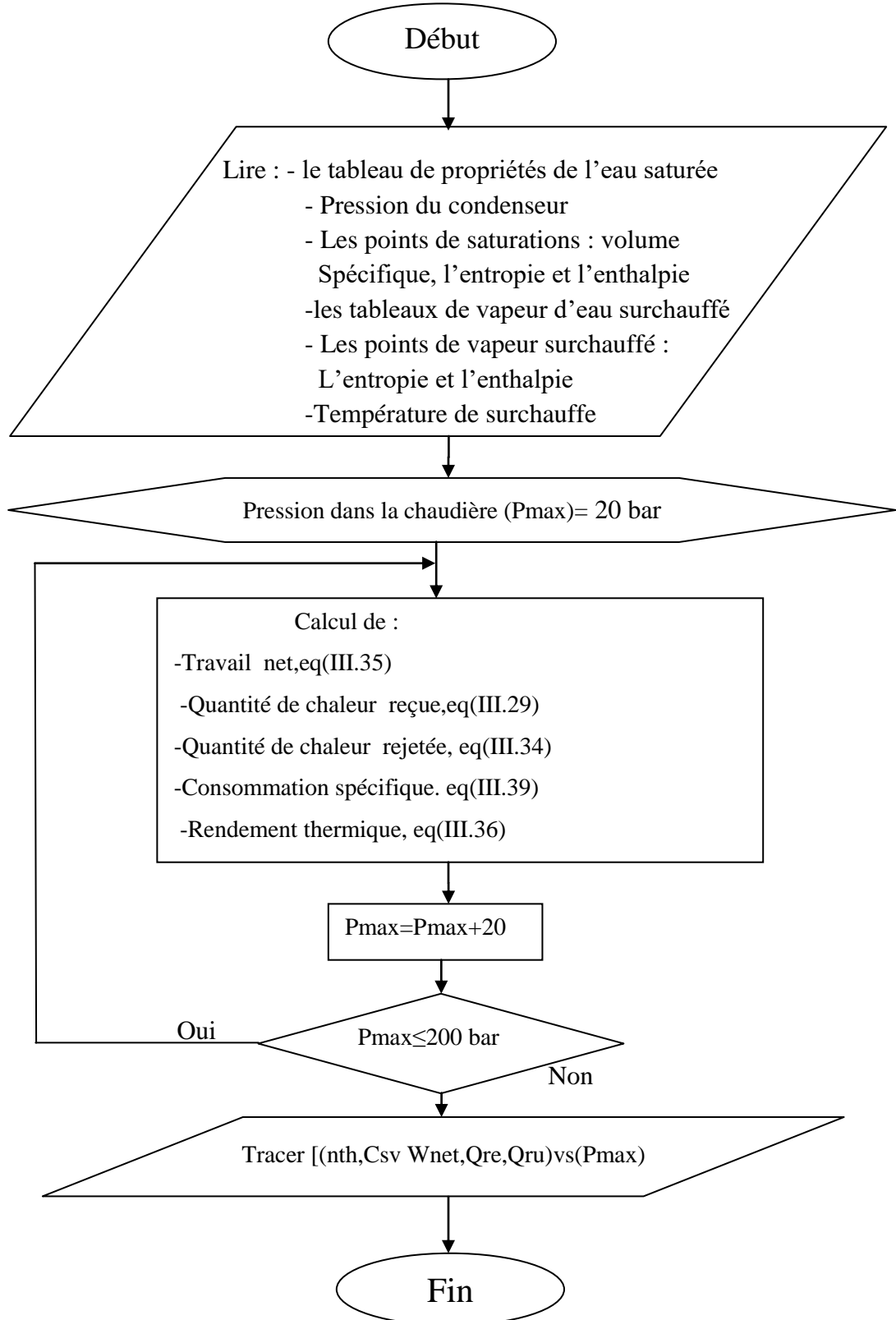
Figure IV. 4 : cycle de Rankine surchauffe sur MATLAB.

Après l'exécution des programmes de calculs des paramètres de cycle de Rankine simple et surchauffe, et pour les mêmes pressions maximal et minimal et avec la même température,

En trouve une augmentation du rendement thermique sur le cycle de surchauffe par rapport à le cycle simple.

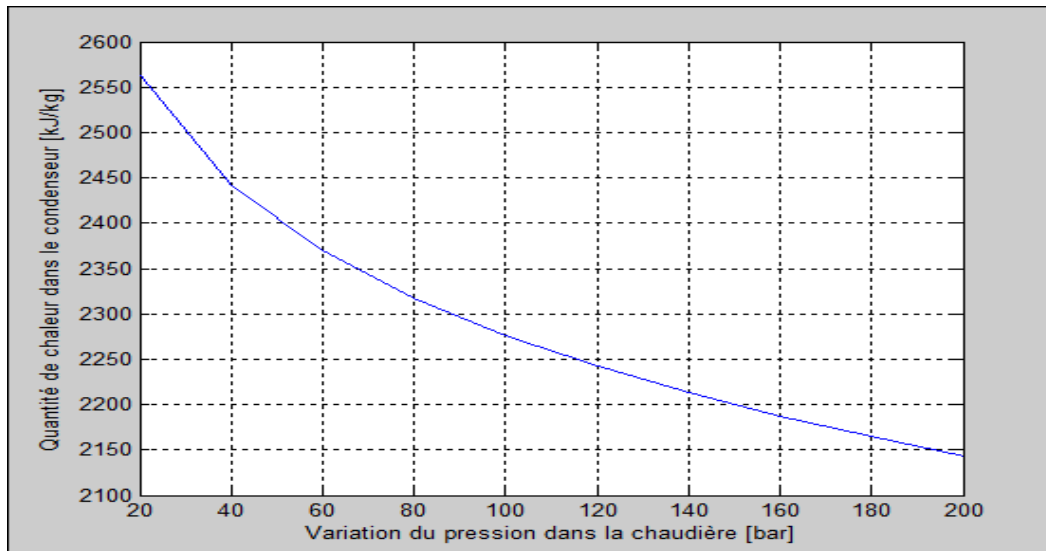
### IV. 3.l'influence de la pression dans la chaudière :

L'influence de la pression dans la chaudière est étudiée en utilisant le programme MATLAB. L'organigramme de ce programme est comme le suivant :

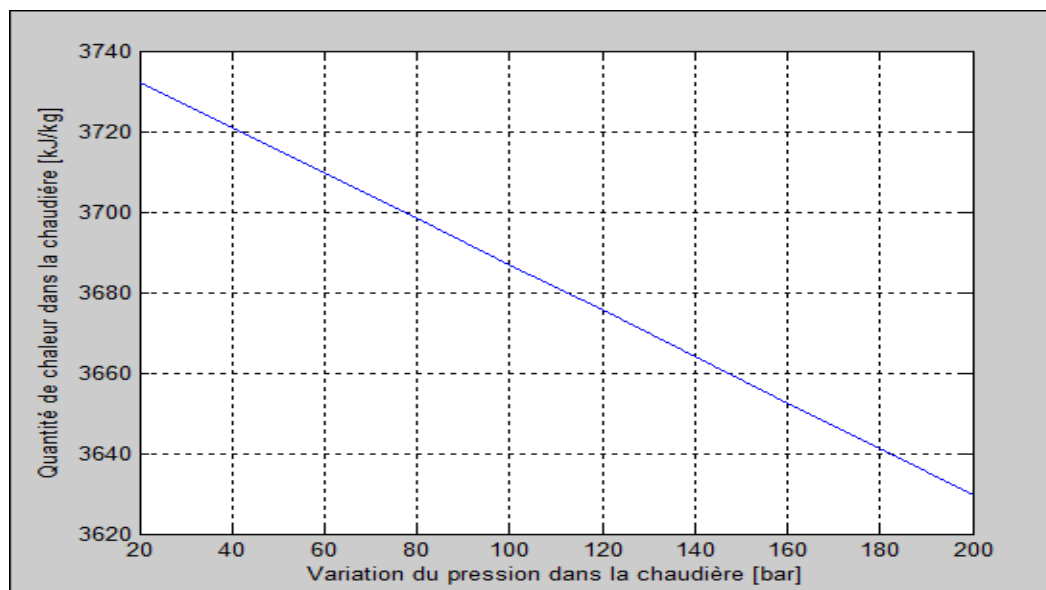


L'exécution du programme avec des valeurs de pression du condenseur et de température de surchauffe sont prises égale à 1 bar et 800C° respectivement. La valeur de pression maximale dans la chaudière varie de 20 bar jusqu'à 200 bar.

Les résultats de calcul sont les suivant :

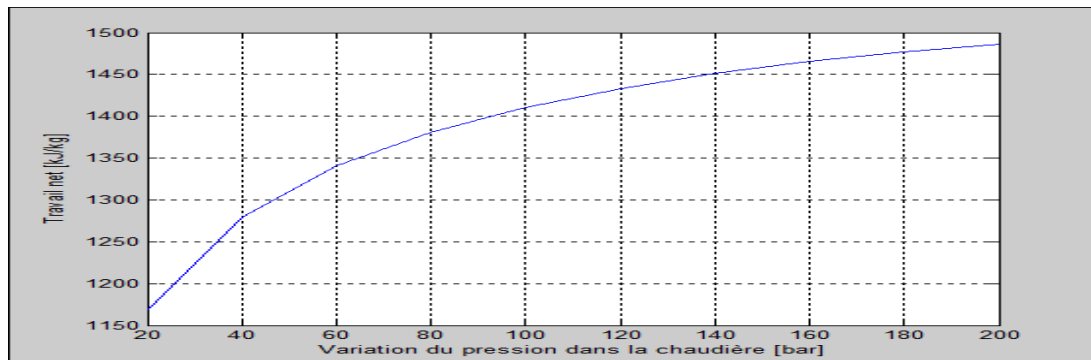


(A)

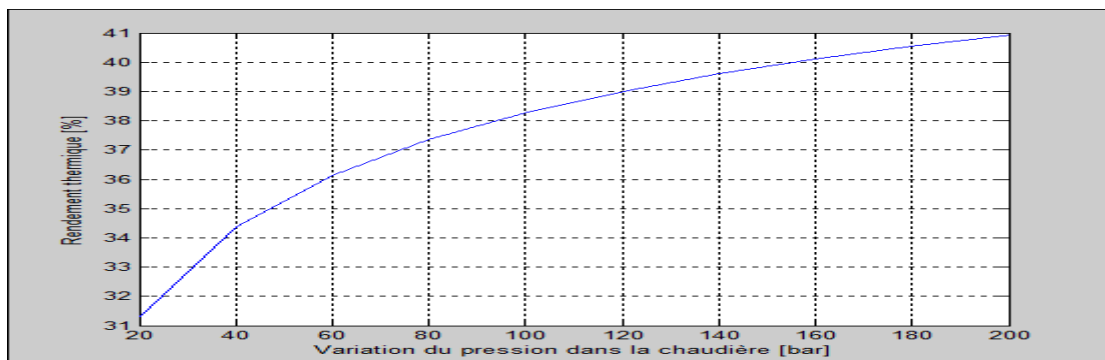


(B)

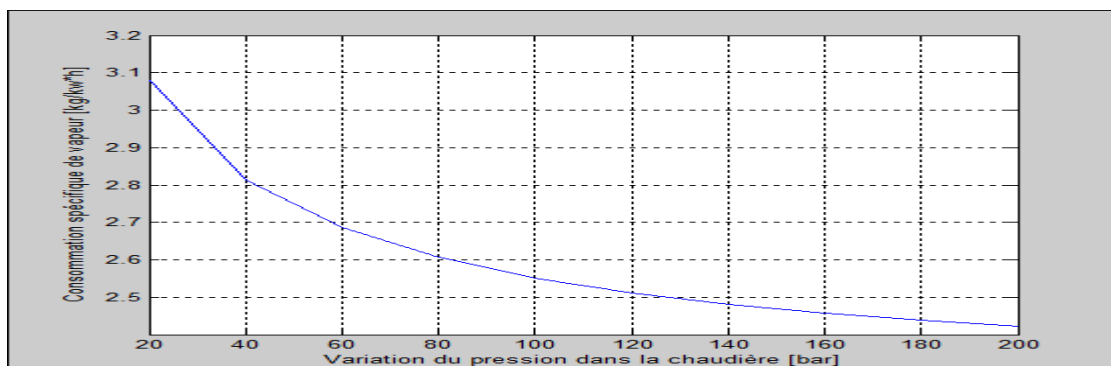




(C)



(D)



(E)

**Figure IV. 5 : L'influence de la pression dans la chaudière sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur).**

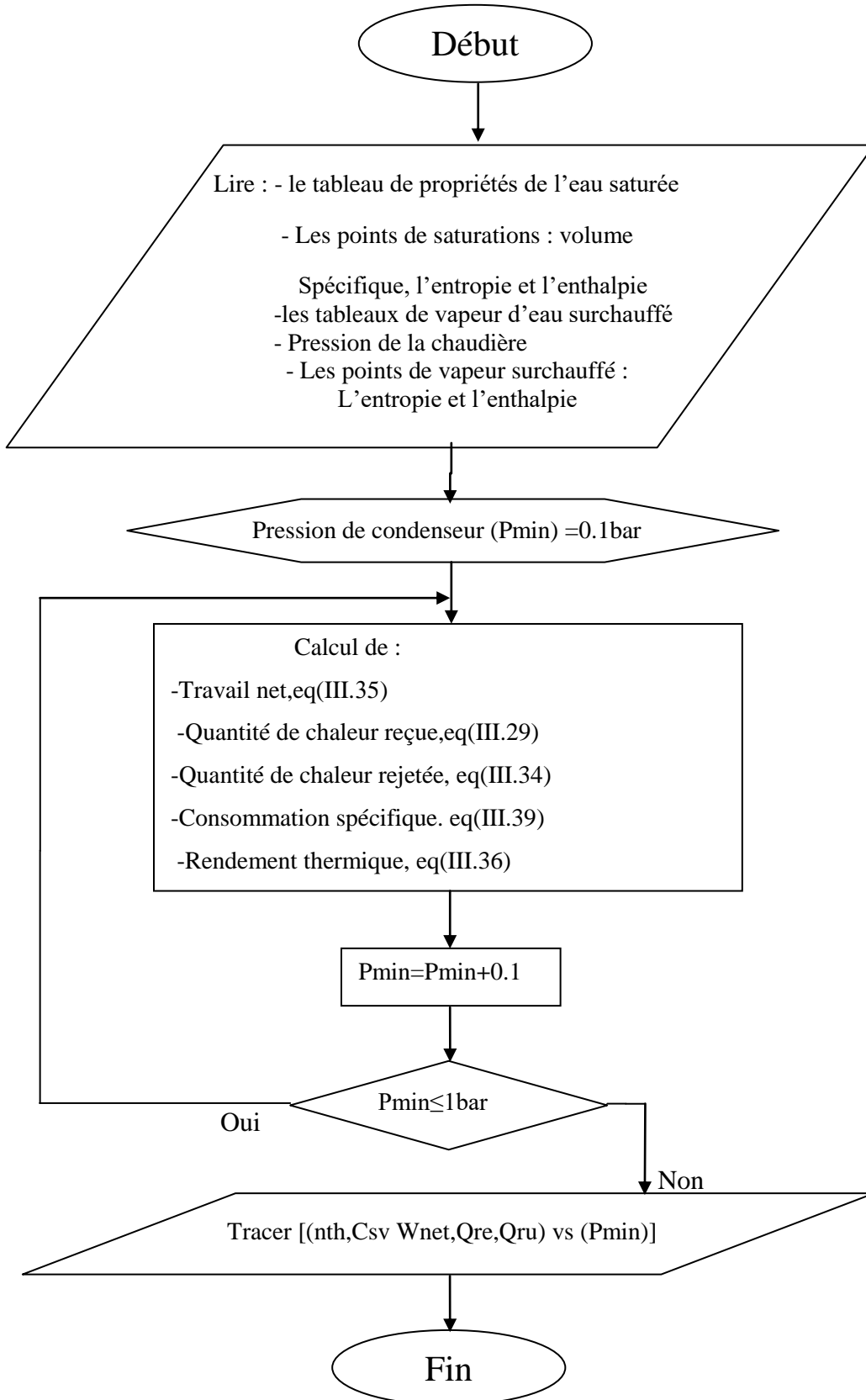
L'influence de la pression dans la chaudière sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe est illustrée sur les figures IV-05. L'augmentation de la pression maximale dans la chaudière est accompagnée par une augmentation de la quantité de chaleur reçue par la chaudière et la quantité de chaleur rejetée par le condenseur reste constante, voire la figure IV-05(A) (B). Cette augmentation provoque une augmentation de travail net, figure IV-05(C).

L'accroissement de la pression dans la chaudière de 40 bar jusqu'à 200 bar provoque une augmentation presque de 06 % du rendement thermique voir la figure IV-05 (D) et une diminution de la consommation spécifique de vapeur de cycle sur la figure (E).

Donc qu'il est préférable que la chaudière fonctionne avec des hautes pressions.

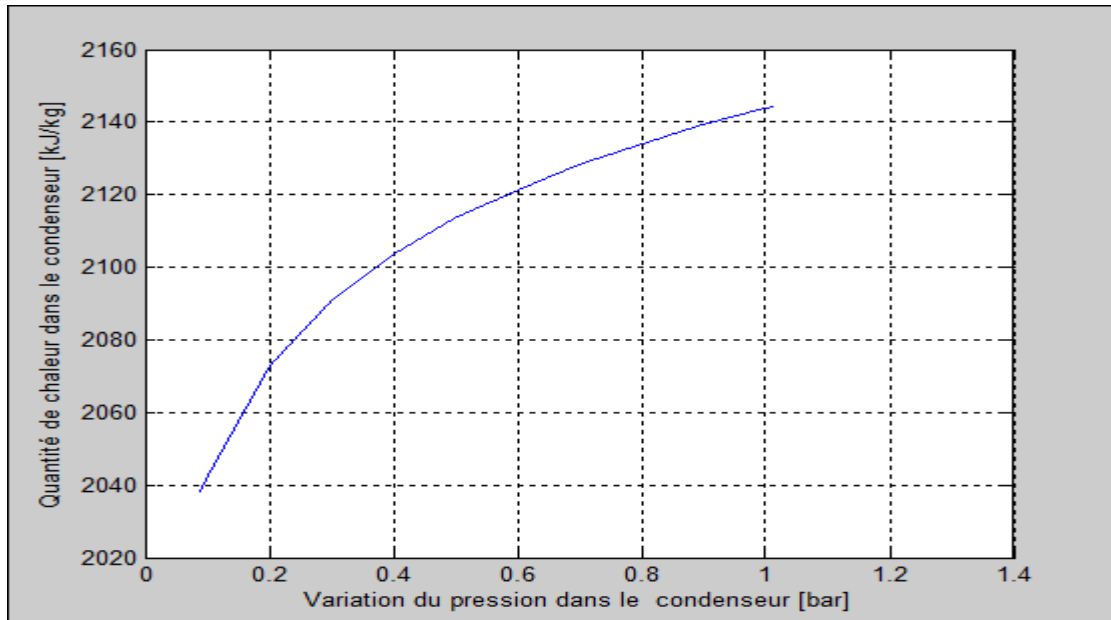
#### IV.4.l'influence de la pression dans le condenseur :

L'influence de la pression dans le condenseur est étudiée en utilisant le programme MATLAB développée, L'organigramme de ce programme est comme le suivant :

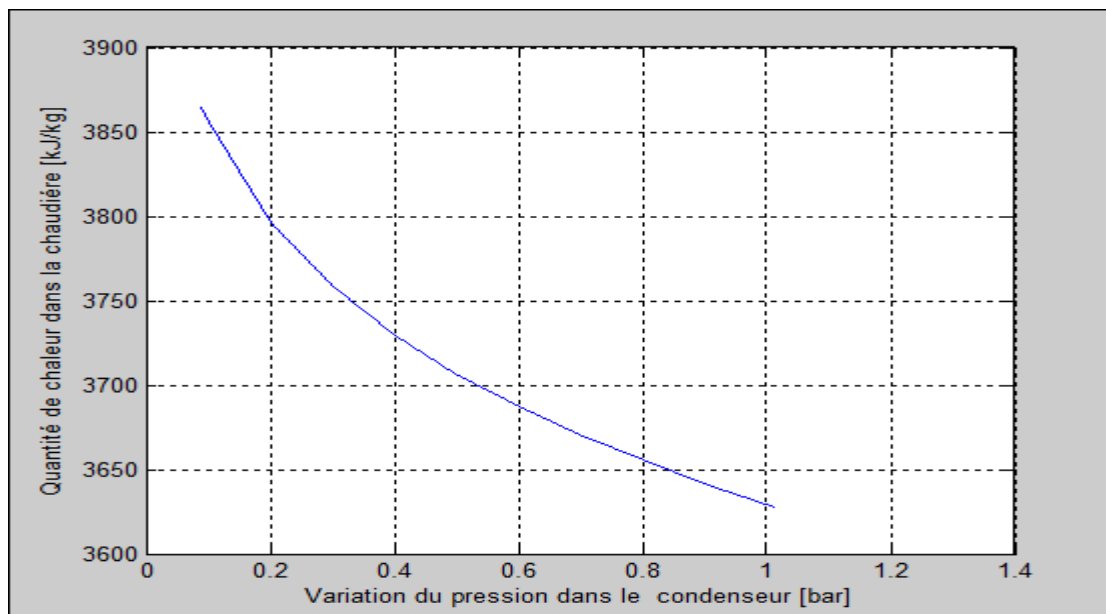


L'exécution du programme avec des valeurs de pression maximal égale à 200 bar et température de surchauffe égale à 800 C°. La valeur de pression dans le condenseur varie de 0.1 bar jusqu'à 1 bar.

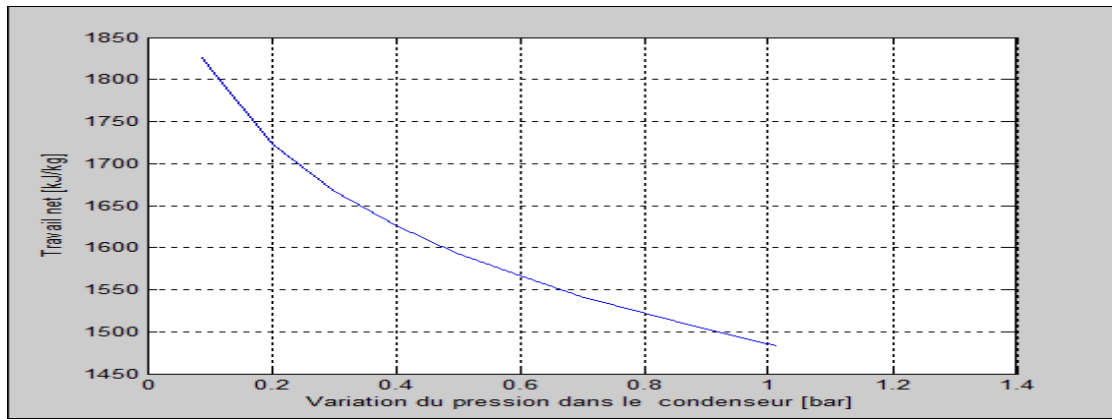
Les résultats de calcul sont les suivant :



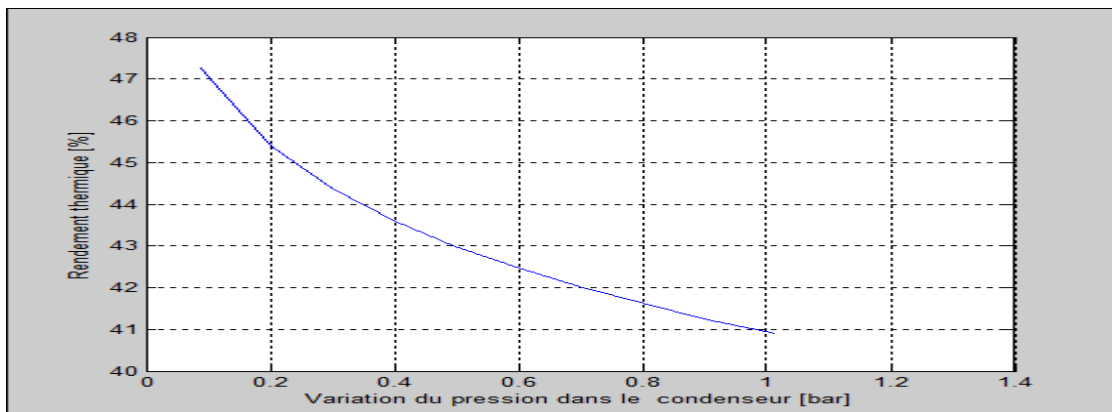
(A)



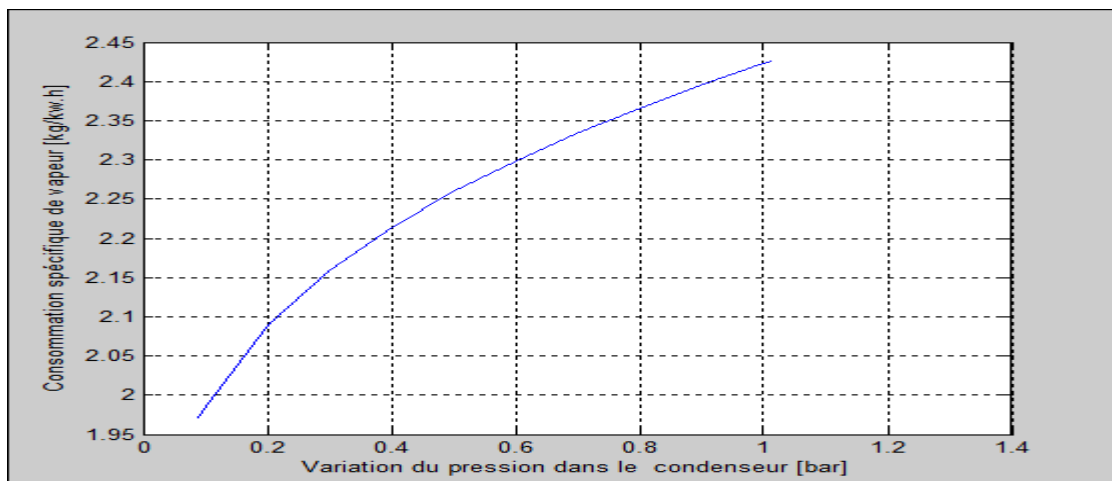
(B)



(C)



(D)



(E)

Figure IV. 6 : L'influence de la pression de condenseur sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans la chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur).

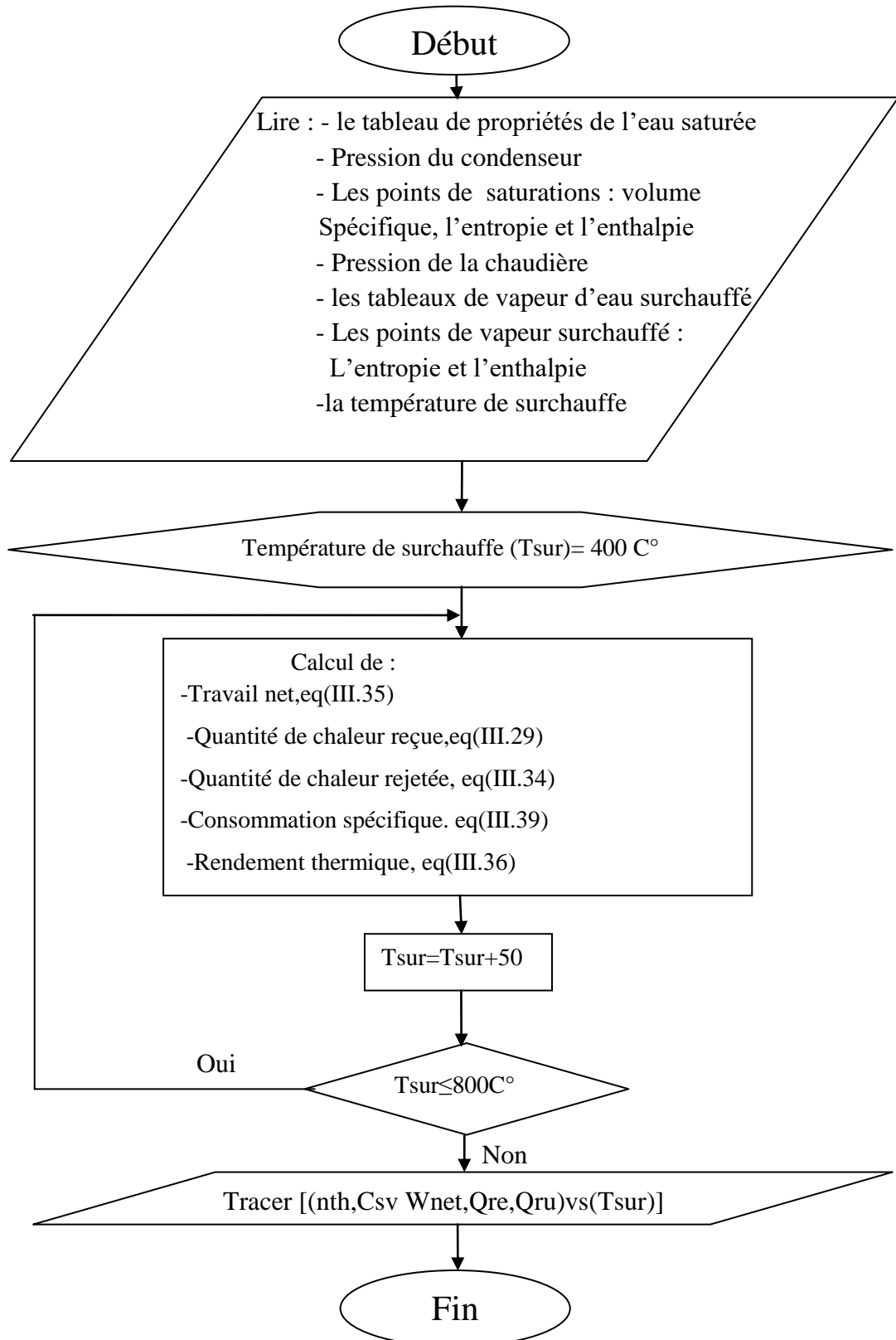
L'influence de la pression de condenseur sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe est illustrée sur les figures IV-06. L'augmentation de la pression dans le condenseur est accompagnée par une diminution de la quantité de chaleur reçue par la chaudière et une augmentation de la quantité de chaleur rejetée par le condenseur, voire la figure IV-06 (A) et (B). Cette augmentation provoque une diminution de travail net, figure IV-06 (C). On remarque sur la figure IV-06 (E) et (D) que l'accroissement de la pression dans le condenseur de 0.01 bar jusqu'un 1 bar est suivi par une élévation de la consommation spécifique de vapeur et une diminution de 7 % du rendement thermique de cycle.

Donc qu'il est préférable que le condenseur fonctionne avec des bases pression (sous vide).

### IV.5.l'influence de la température de surchauffe :

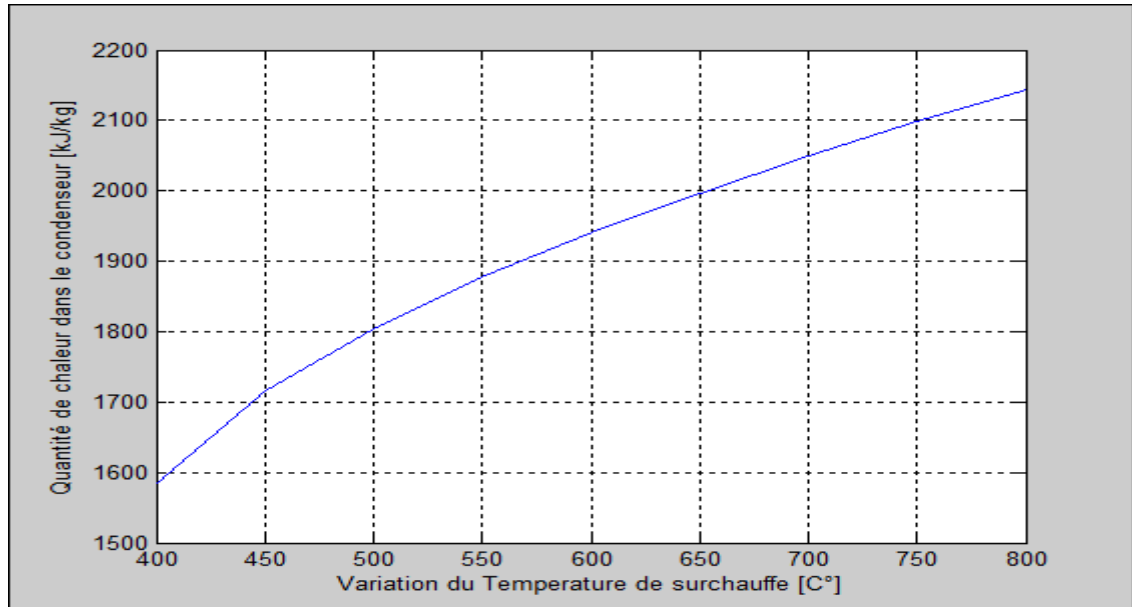
#### IV.5.1.l'influence de la température de surchauffe avec une pression dans la chaudière constante :

L'influence de la température de surchauffe est étudiée en utilisant le programme MATLAB. L'organigramme de ce programme est comme le suivant :

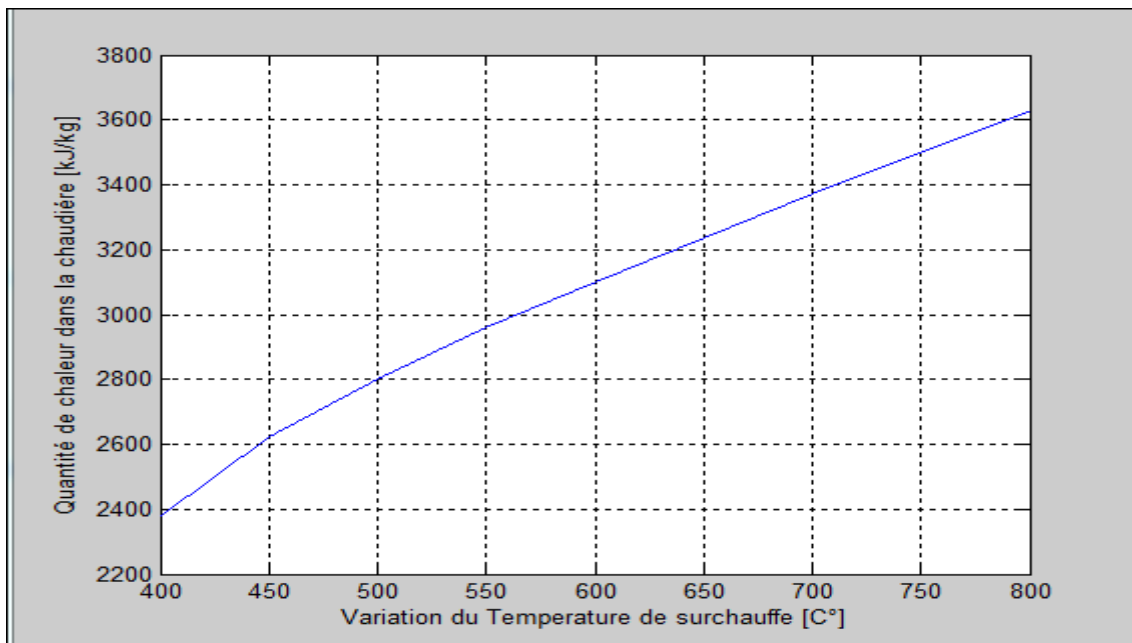


L'exécution du programme avec une valeur constant de pression du condenseur égal à 1 bar avec une pression maximal égal à 200 bar et bar et une température de surchauffe varie entre 400 C° jusqu'à 800 C°.

Les résultats de calcul sont les suivant :

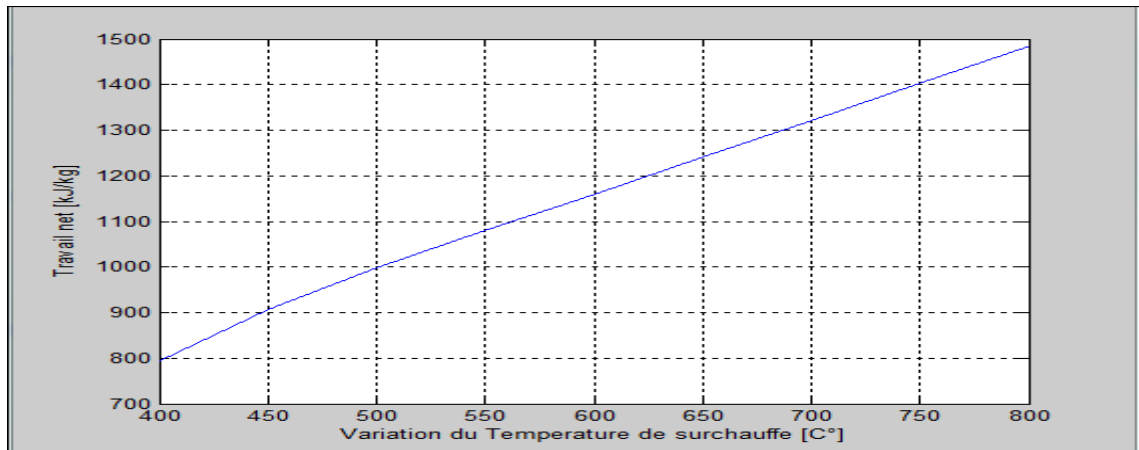


(A)

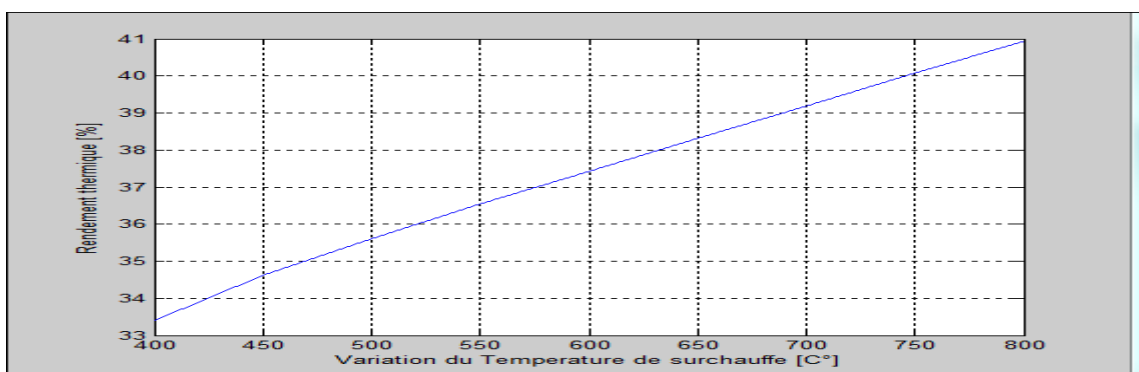


(B)

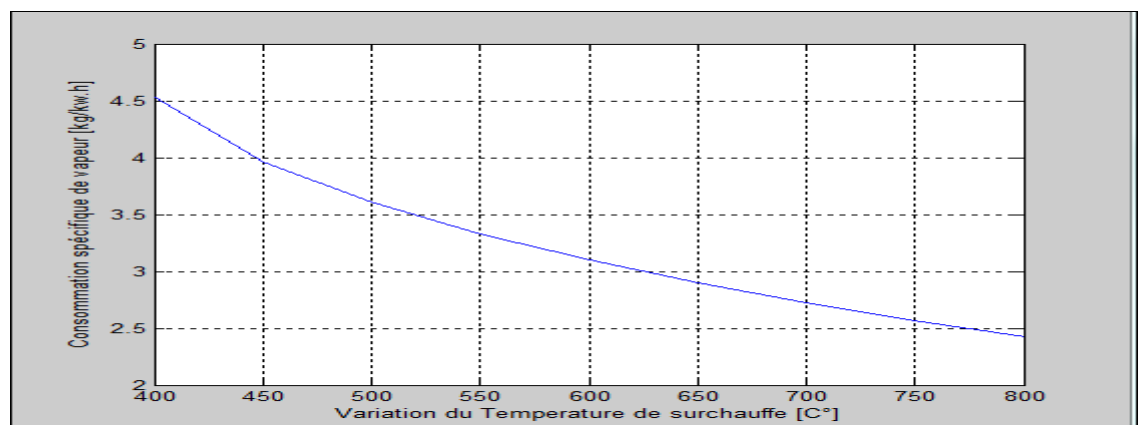




(C)



(D)



(E)

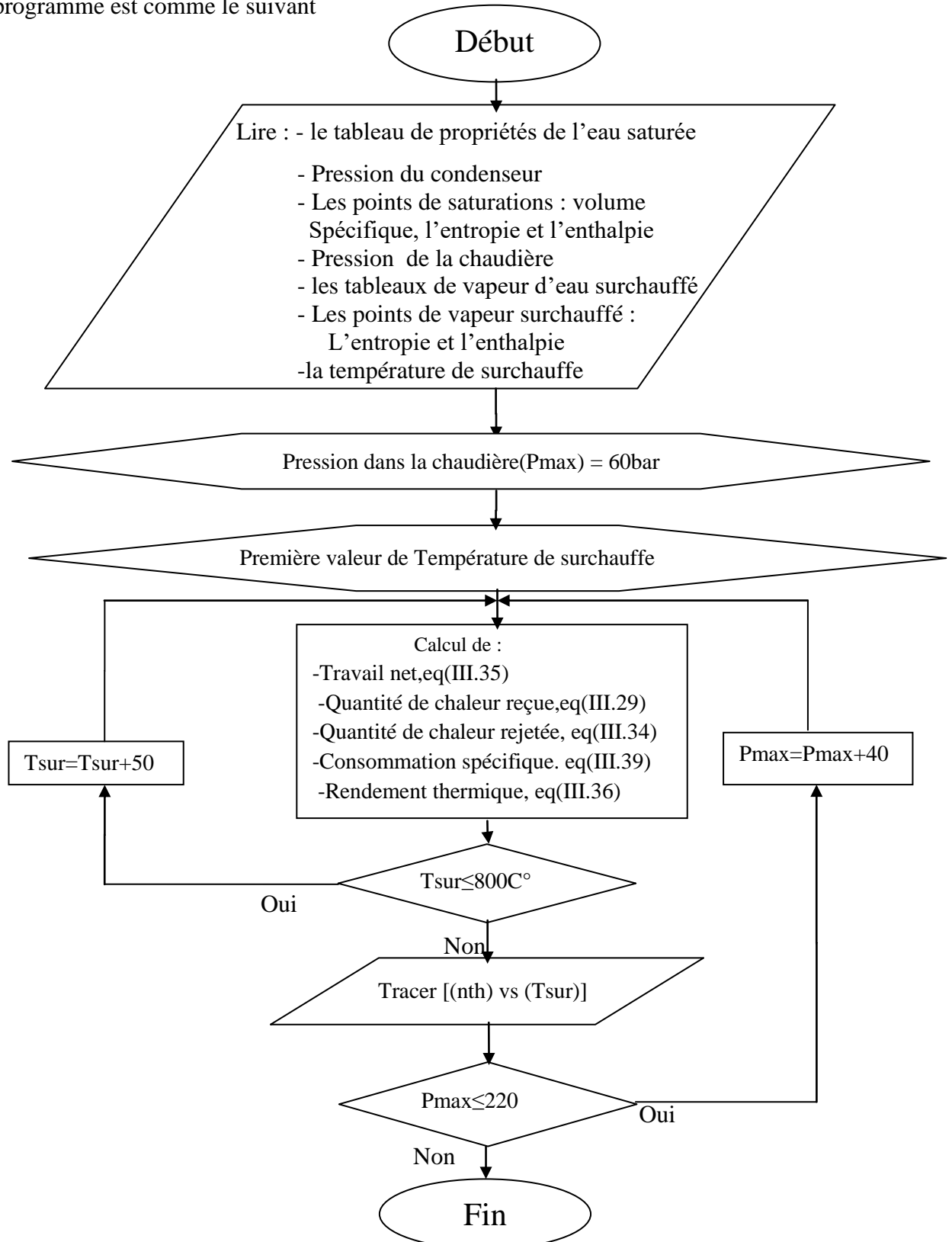
**Figure IV. 7 : L'influence de la température surchauffe sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur).**

L'influence de la température de surchauffe sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe est illustrée sur les figures IV-07. L'augmentation de la température de surchauffe est accompagnée par une augmentation de la quantité de chaleur rejetée par le condenseur et de la quantité de chaleur reçue par la chaudière, voire la figure IV-07(A) (B). Cette augmentation provoque une augmentation de travail net, figure IV-07(C).

L'accroissement de la température de surchauffe de 400C° jusqu'à 800C° provoque une élévation de 08% du rendement thermique voir la figure IV-07 (D) et une diminution de la consommation spécifique de vapeur de cycle sur la figure IV-07(E)

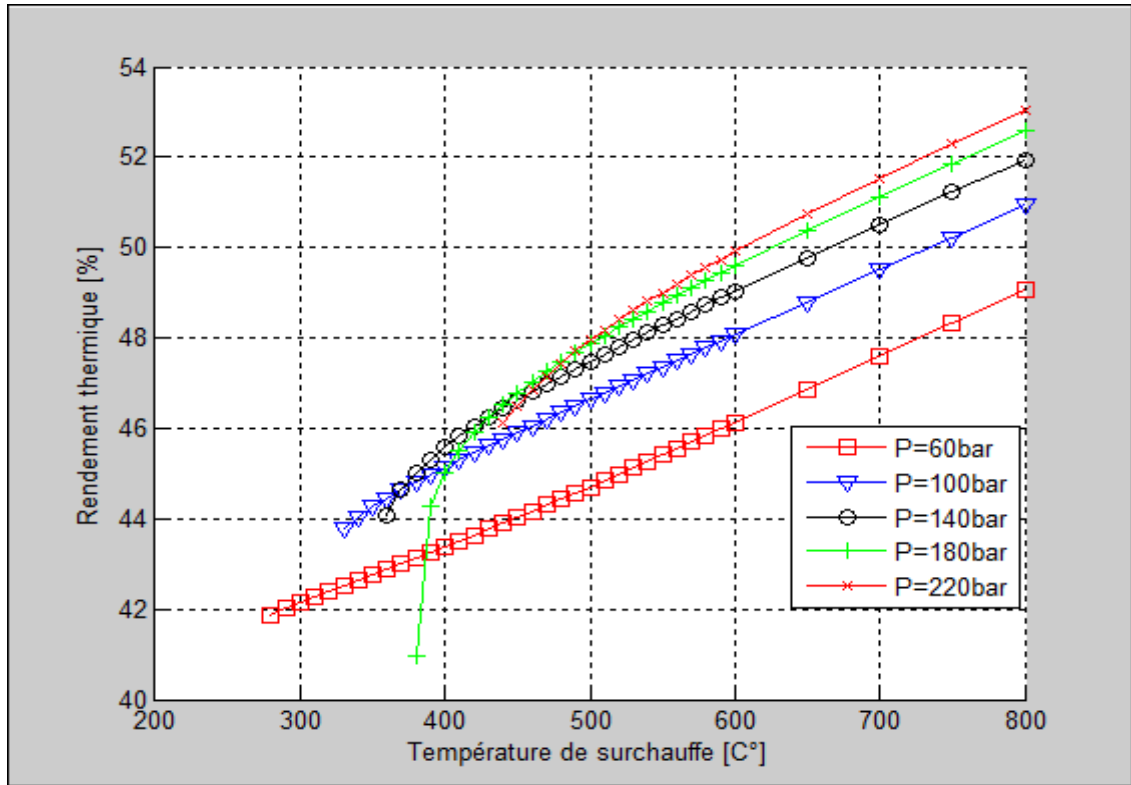
### IV.5.2. l'influence de la température de surchauffe pour différents pression dans la chaudière

L'influence de la température de surchauffe avec plusieurs valeurs de pression dans la chaudière est étudiée en utilisant le programme MATLAB. L'organigramme de ce programme est comme le suivant



L'exécution du programme avec une valeur constant de pression du condenseur égal à 0.007 bar avec pression dans la chaudière varie de 60 bar jusqu'à 220 bar et la température de surchauffe varie de 300 C° jusqu'à 800 C°

Les résultats de calcul sont les suivant :



**Figure IV. 8 : L'influence de la température de surchauffe avec différentes valeurs des pressions dans la chaudière sur le rendement thermique de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe**

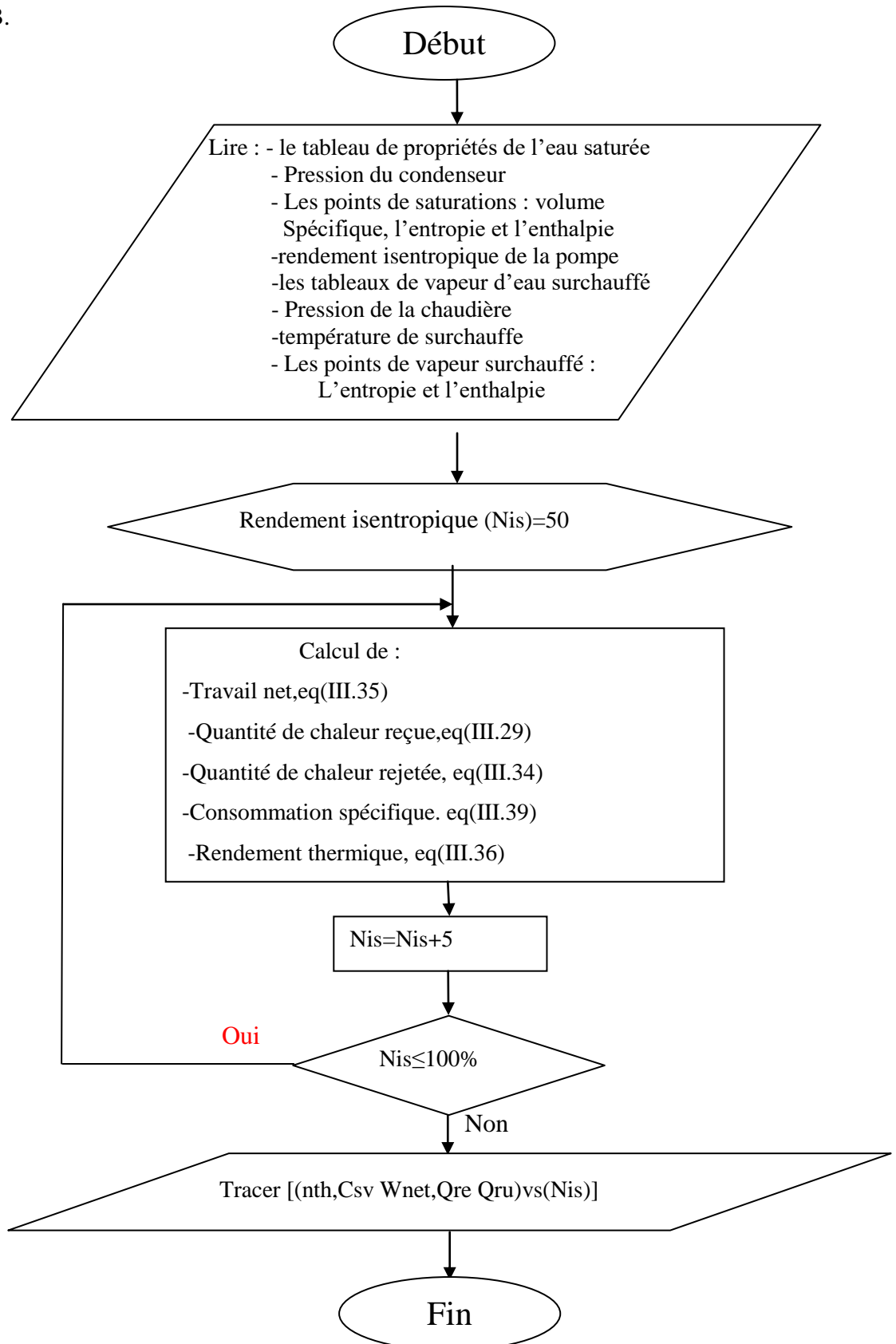
L'influence de la température de surchauffe pour plusieurs pressions dans la chaudière sur le rendement thermique de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe est illustrée sur les figures IV-08.

On remarque sur la figure IV-08 que pour les valeurs de température de surchauffe inférieur à 400°C un chevauchement dans les courbes de pression puisque les valeurs de la pression supérieure à 160 bar se situe près de cycle de Rankine simple.

L'accroissement de la température de surchauffe et de la pression dans la chaudière provoque une augmentation du rendement thermique du cycle. Donc qu'il est préférable que la chaudière fonctionne avec des grandes pressions et une température de surchauffe élevée.

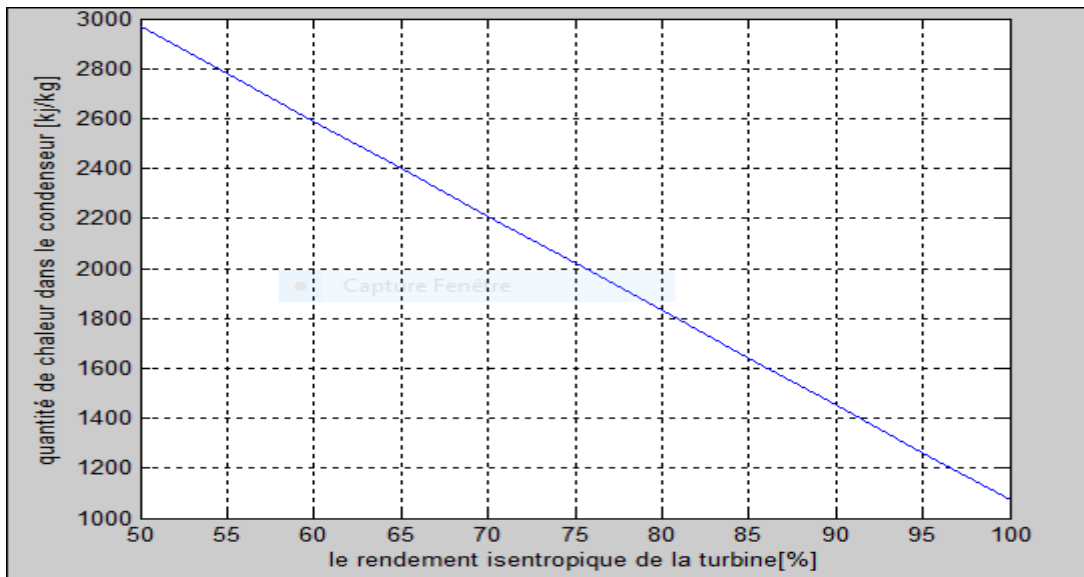
### IV.6.l'influence de l'irréversibilité des transformations thermodynamique

L'influence de rendement isentropique de la turbine est étudiée en utilisant le programme MATLAB.

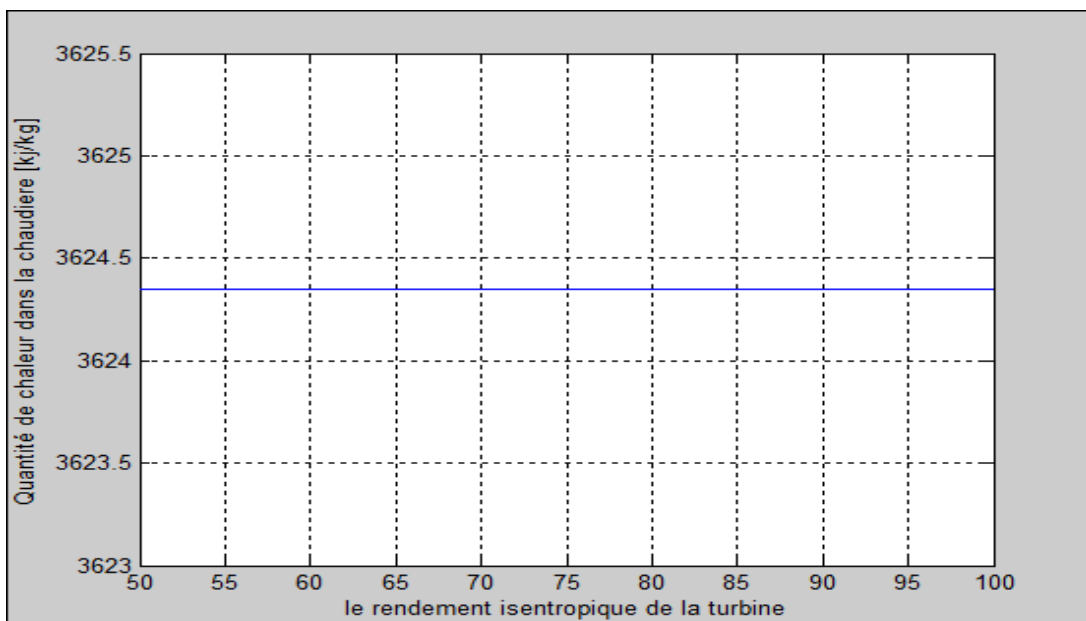


L'exécution du programme avec des valeurs de pression du condenseur, pression maximale dans la chaudière et température de surchauffe constant où les valeurs de pression du condenseur, pression maximale dans la chaudière, et température de surchauffe sont prises égales à 1 bar, 200 bar, et 800 C° respectivement, avec un rendement isentropique de la pompe égal à 80%

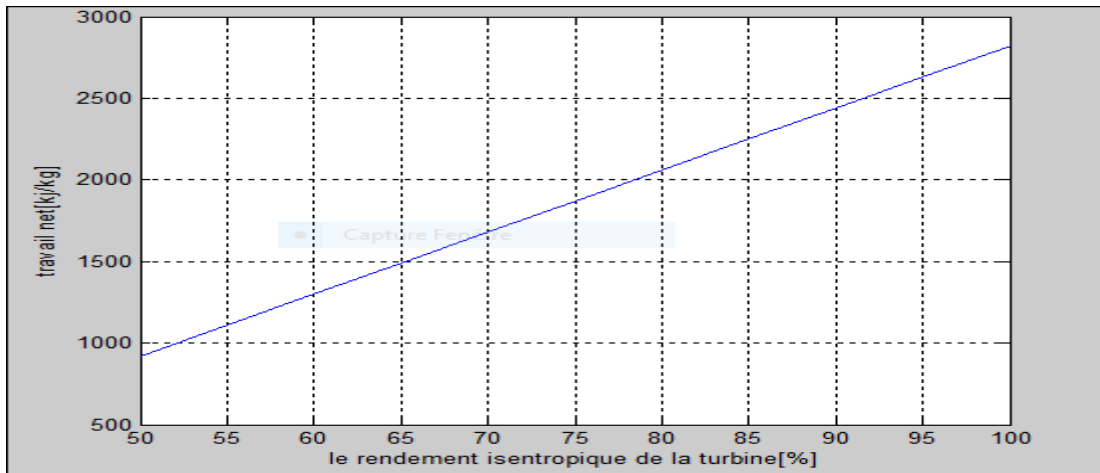
La valeur du rendement isentropique de la turbine vari de 50% jusqu'à 100%. Les résultats de calcul sont les suivant :



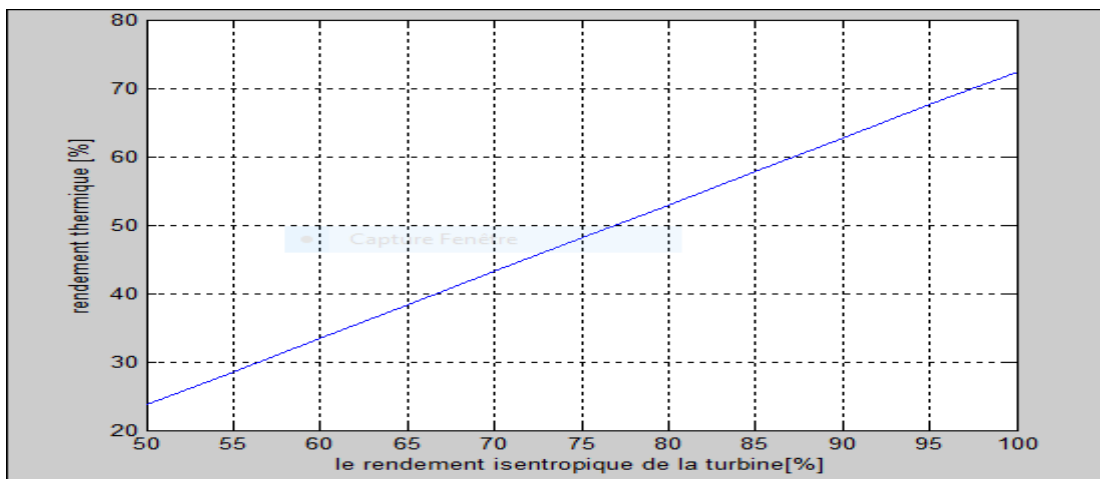
(A)



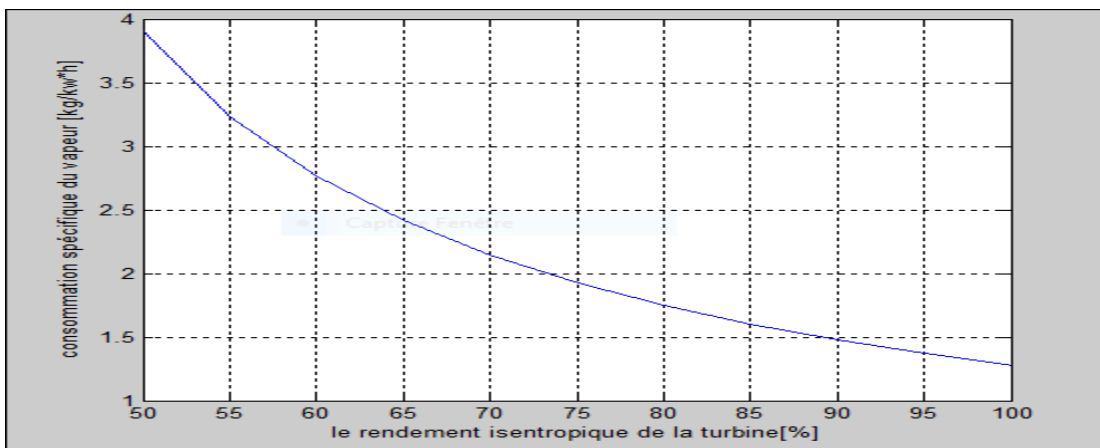
(B)



(C)



(D)



(E)

Figure IV. 9 : L'influence de rendement isentropique sur les performances de L'installation thermique à vapeur avec surchauffe (A : quantité de chaleur dans le condenseur : quantité de chaleur dans le chaudière, C : travail net : rendement thermique : consommation spécifique de vapeur).

L'influence de rendement isentropique sur les performances de L'installation thermiques à vapeur avec surchauffe est illustrée sur les figures IV-09. L'augmentation du rendement isentropique est accompagnée par une diminution de la quantité de chaleur rejetée par le condenseur voire la figure IV-09 (A), la quantité de chaleur reçue par la chaudière reste constante, voire la figure IV-09(B). Cette augmentation provoque une augmentation du travail net du cycle voire la figure IV-09 (C), On remarque sur la figure IV-09 (E) que l'accroissement de rendement isentropique est accompagné par une diminution de la consommation spécifique de vapeur.

La figure IV-09 (D) montre une augmentation de rendement isentropique de 50% jusqu'à 100% est accompagnée par une croissance de 50% du rendement thermique de cycle.



# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERAL

---

### **Conclusion générale :**

Dans le but de la recherche de meilleure efficacité des centrales thermique à vapeur nous avons proposer dans ce mémoire premièrement de comprendre le principe de fonctionnement des centrales, cette étude nous à permet de parlé sur les cycles thermodynamiques, t'elle que le cycle de Rankine simple, et les cycles de Rankine amélioré.

Le travail que nous avons présenté sert a voire l'influence de la pression de condenseur, la pression dans la chaudière, la température de la surchauffe et le rendement isentropique de la turbine sur la quantité de chaleur reçue et rejetée, le travail net, le rendement thermique et la consommation spécifique du vapeur. Nous avons présenté une comparaison avec le cycle de Rankine simple, et le cycle de Rankine surchauffé.

Pour cet objectif nous avons continué à la contribution du des programmes élaboré avec l'outil de programmation MATLAB.

Les résultats des calculs montrent que le cycle de Rankine surchauffé possède le meilleur rendement par rapport au cycle simple. Le cycle de Rankine surchauffé est très sensible aux irréversibilités des transformations thermodynamique.

# **Bibliographies**

## Bibliographies

- [1] **Eric goncalvés et Jean-pul thiboult**- Cycle thermodynamique des machine thermique. octobre 2008.
- [2] **Thomas.a.edision** : Cours 9-cycle moteurs à vapeur.
- [3] **Olivier Cleynen** : thermodynamique de l'ingénieur Edition Masson
- [4] **Frédéric Doumenc** : Eléments de thermodynamique et thermique, Edition Dunod
- [5] **Yann marchesse** : Mécanique des fluides ´Edition Année universitaire 2011-2012.
- [6] **Marie-Noëlle Dumont** : aide mémoire Simulation et Aide au Dimensionnement des Chaudières de Récupération
- [7] **Diviier perrot** : Compresseur et turbine, Edition Andre Desvigne
- [8] **Jean Gasting** : Technologie et principe de fonctionnement de l'échangeur de chaleur.2002
- [9] **Philippe Hartmann** : Centrales nucléaires et environnement Edition Eyrolles
- [10] **Michael J.moran, Howard N.Shapiro** : Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th Edition 2004.
- [11] **Mathieu bardeau** : Les energies renouvelables, Edition Mc Graw-Hil
- [12] **Quoilin sylvain** : Les centrales solaires à concentration, Edition Mc GrawHill
- [13] **Michael J. moran, Howard N. Shapiro Daisie D. Boettner, Margaret B. BAILEY**: Fundamentals of Engineering Thermodynamics 7th Edition 2011.
- [14] **Omer dunkerque** : **Cours de thermodynamique 2ème semestre. Edition Masson**
- [15] **CHIH WU**: Thermodynamics and heat powererd cycles, 2007 by Nova Science Publishers, Inc.
- [16] **julien Bobroff** : Thermodynamique classique. 2009 3rdnEdition 1996
- [17] **Raffaele bolliger** : Méthodologie de la synthèse des systèmes énergétiques Industriels. 15 NOVEMBRE 2010.

## BIBLIOGRAPHIE

---

[18] **Georges HEYEN** : Analyse exergetique des systemes industriels Edition R´ eal

[19] **Mercier J.M., Zanchi G., Pérez J.P** : ´ Energie m´ ecanique, ´ energie interne, ´ energie et premier principe de la thermodynamique, Soumis à l’Union de Physiciens, Mars 1990.

[20] **R.VICHNIEVSKY** : Thermodynamique appliqu´ e aux machines, Edition Masson 1994.

[21] **J.L.QUEYREL J.MESPLEDE** : Pr´ ecis de physique thermodynamique cours et exercice sr´ esolus, Edition R´ eal 2000.

## ANNEXES

### Annexe A : la table de propriétés de vapeur saturée

P [bar]	T [c°]	$v_f$ [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	$h_f$ [kJ/kg]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_f$ [kJ/kgK <sup>-1</sup> ]	$s_g$ [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
0.007	1.88090	0.00100011	7.88979	2504.35	0.028782	9.1058
0.008	3.76142	0.00100007	15.8087	2507.80	0.057477	9.0567
0.009	5.44443	0.00100009	22.8881	2510.89	0.082965	9.0135
0.01	6.96963	0.00100014	29.2982	2513.68	0.10591	8.9749
0.02	17.4953	0.00100136	73.4346	2532.91	0.26058	8.7227
0.03	24.0799	0.00100277	100.990	2544.88	0.35433	8.5766
0.04	28.9615	0.00100410	121.404	2553.71	0.42245	8.4735
0.05	32.8755	0.00100532	137.765	2560.77	0.47625	8.3939
0.06	36.1603	0.00100645	151.494	2566.67	0.52087	8.3291
0.07	39.0009	0.00100749	163.366	2571.76	0.55908	8.2746
0.08	41.5101	0.00100847	173.852	2576.24	0.59253	8.2274
0.09	43.7618	0.00100939	183.262	2580.25	0.62233	8.1859
0.1	45.8075	0.00101026	191.812	2583.89	0.64922	8.1489
0.2	60.0586	0.00101714	251.400	2608.95	0.83195	7.9072
0.3	69.0954	0.00102222	289.229	2624.55	0.94394	7.7675
0.4	75.8568	0.00102636	317.566	2636.05	1.0259	7.6690
0.5	81.3167	0.00102991	340.476	2645.21	1.0910	7.5930
0.6	85.9258	0.00103306	359.837	2652.85	1.1452	7.5311
0.7	89.9315	0.00103589	376.680	2659.42	1.1919	7.4790
0.8	93.4854	0.00103849	391.639	2665.18	1.2328	7.4339
0.9	96.6870	0.00104090	405.128	2670.31	1.2694	7.3942
1.0	99.6059	0.00104315	417.436	2674.95	1.3026	7.3588
1.01325	99.9743	0.00104344	418.991	2675.53	1.3067	7.3544
1.1	102.292	0.00104526	428.775	2679.18	1.3328	7.3268
1.2	104.784	0.00104727	439.299	2683.06	1.3608	7.2976
1.3	107.109	0.00104917	449.132	2686.65	1.3867	7.2708
1.4	109.292	0.00105098	458.367	2689.99	1.4109	7.2460
1.5	111.350	0.00105272	467.081	2693.11	1.4335	7.2229
1.6	113.298	0.00105440	475.336	2696.04	1.4549	7.2014
1.7	115.149	0.00105601	483.184	2698.81	1.4752	7.1811
1.8	116.912	0.00105756	490.668	2701.42	1.4944	7.1620
1.9	118.597	0.00105906	497.825	2703.89	1.5127	7.1440
2.0	120.212	0.00106052	504.684	2706.24	1.5301	7.1269
2.1	121.761	0.00106193	511.273	2708.48	1.5468	7.1106
2.2	123.251	0.00106331	517.615	2710.62	1.5628	7.0951
2.3	124.688	0.00106464	523.731	2712.66	1.5782	7.0802
2.4	126.074	0.00106595	529.637	2714.62	1.5930	7.0660
2.5	127.414	0.00106722	535.350	2716.50	1.6072	7.0524
2.6	128.711	0.00106846	540.884	2718.31	1.6210	7.0393
2.7	129.968	0.00106968	546.251	2720.04	1.6343	7.0267

## ANNEXES

2.8	131.188	0.00107087	551.462	2721.72	1.6472	7.0146
2.9	132.373	0.00107203	556.527	2723.33	1.6597	7.0029
3.0	133.525	0.00107318	561.455	2724.89	1.6718	6.9916
3.1	134.647	0.00107430	566.255	2726.40	1.6835	6.9806
3.2	135.740	0.00107540	570.935	2727.86	1.6950	6.9700
3.3	136.806	0.00107648	575.500	2729.27	1.7061	6.9597
3.4	137.845	0.00107754	579.957	2730.64	1.7169	6.9498
3.5	138.861	0.00107858	584.311	2731.97	1.7275	6.9401
3.6	139.853	0.00107961	588.569	2733.25	1.7378	6.9307
3.7	140.823	0.00108062	592.735	2734.51	1.7478	6.9215
3.8	141.773	0.00108161	596.813	2735.72	1.7576	6.9126
3.9	142.702	0.00108259	600.808	2736.91	1.7672	6.9039
4.0	143.613	0.00108356	604.723	2738.06	1.7766	6.8954
4.1	144.505	0.00108451	608.563	2739.18	1.7858	6.8872
4.2	145.380	0.00108545	612.330	2740.27	1.7948	6.8791
4.3	146.238	0.00108638	616.027	2741.33	1.8036	6.8712
4.4	147.081	0.00108729	619.657	2742.37	1.8122	6.8635
4.5	147.908	0.00108820	623.224	2743.39	1.8206	6.8560
4.6	148.721	0.00108909	626.730	2744.38	1.8289	6.8486
4.7	149.519	0.00108997	630.177	2745.34	1.8371	6.8414
4.8	150.305	0.00109084	633.567	2746.28	1.8450	6.8343
4.9	151.077	0.00109170	636.902	2747.21	1.8529	6.8274
5.0	151.836	0.00109256	640.185	2748.11	1.8606	6.8206
5.5	155.462	0.00109668	655.877	2752.33	1.8972	6.7885
6.0	158.832	0.00110061	670.501	2756.14	1.9311	6.7592
6.5	161.986	0.00110436	684.216	2759.60	1.9626	6.7321
7.0	164.953	0.00110797	697.143	2762.75	1.9921	6.7070
7.5	167.755	0.00111144	709.384	2765.64	2.0198	6.6835
8.0	170.414	0.00111479	721.018	2768.30	2.0460	6.6615
8.5	172.943	0.00111803	732.113	2770.76	2.0708	6.6408
9.0	175.358	0.00112118	742.725	2773.04	2.0944	6.6212
9.5	177.669	0.00112425	752.901	2775.15	2.1169	6.6027
10.0	179.886	0.00112723	762.683	2777.12	2.1384	6.5850
10.5	182.017	0.00113015	772.105	2778.95	2.1591	6.5681
11.0	184.070	0.00113299	781.198	2780.67	2.1789	6.5520
11.5	186.050	0.00113578	789.988	2782.27	2.1979	6.5365
12.0	187.965	0.00113850	798.499	2783.77	2.2163	6.5217
12.5	189.817	0.00114118	806.751	2785.17	2.2340	6.5074
13.0	191.613	0.00114380	814.764	2786.49	2.2512	6.4936
13.5	193.355	0.00114638	822.552	2787.73	2.2678	6.4804
14.0	195.047	0.00114892	830.132	2788.89	2.2839	6.4675
14.5	196.693	0.00115141	837.516	2789.98	2.2995	6.4551
15.0	198.295	0.00115387	844.717	2791.01	2.3147	6.4431
15.5	199.856	0.00115629	851.745	2791.97	2.3294	6.4314

## ANNEXES

16.0	201.378	0.00115868	858.610	2792.88	2.3438	6.4200
16.5	202.864	0.00116103	865.322	2793.73	2.3578	6.4090
17.0	204.315	0.00116336	871.888	2794.53	2.3715	6.3983
17.5	205.733	0.00116565	878.316	2795.28	2.3848	6.3878
18.0	207.120	0.00116792	884.614	2795.99	2.3978	6.3776
18.5	208.477	0.00117016	890.788	2796.65	2.4105	6.3676
19.0	209.806	0.00117238	896.844	2797.26	2.4229	6.3579
19.5	211.108	0.00117458	902.786	2797.84	2.4351	6.3484
20.0	212.385	0.00117675	908.622	2798.38	2.4470	6.3392
20.5	213.637	0.00117890	914.355	2798.89	2.4587	6.3301
21.0	214.865	0.00118103	919.989	2799.36	2.4701	6.3212
21.5	216.071	0.00118314	925.530	2799.80	2.4814	6.3125
22.0	217.256	0.00118524	930.981	2800.20	2.4924	6.3040
22.5	218.420	0.00118731	936.345	2800.58	2.5032	6.2956
23.0	219.564	0.00118937	941.626	2800.92	2.5138	6.2874
23.5	220.689	0.00119141	946.827	2801.24	2.5242	6.2793
24.0	221.795	0.00119343	951.952	2801.54	2.5344	6.2714
24.5	222.885	0.00119544	957.003	2801.80	2.5445	6.2636
25.0	223.956	0.00119744	961.983	2802.04	2.5544	6.2560
25.5	225.012	0.00119942	966.895	2802.26	2.5642	6.2485
26.0	226.052	0.00120139	971.740	2802.45	2.5738	6.2411
26.5	227.076	0.00120334	976.521	2802.63	2.5832	6.2338
27.0	228.086	0.00120528	981.241	2802.78	2.5925	6.2266
27.5	229.081	0.00120721	985.901	2802.91	2.6017	6.2196
28.0	230.063	0.00120913	990.503	2803.02	2.6107	6.2126
28.5	231.031	0.00121104	995.050	2803.11	2.6196	6.2058
29.0	231.986	0.00121294	999.542	2803.18	2.6284	6.1990
29.5	232.928	0.00121482	1003.98	2803.23	2.6371	6.1924
30.0	233.858	0.00121670	1008.37	2803.26	2.6456	6.1858
30.5	234.777	0.00121857	1012.71	2803.28	2.6541	6.1793
31.0	235.684	0.00122042	1017.00	2803.28	2.6624	6.1729
31.5	236.580	0.00122227	1021.25	2803.27	2.6706	6.1666
32.0	237.464	0.00122411	1025.45	2803.24	2.6787	6.1604
32.5	238.339	0.00122594	1029.61	2803.19	2.6867	6.1542
33.0	239.203	0.00122777	1033.72	2803.13	2.6946	6.1481
33.5	240.057	0.00122958	1037.79	2803.05	2.7025	6.1421
34.0	240.901	0.00123139	1041.83	2802.96	2.7102	6.1362
34.5	241.736	0.00123319	1045.82	2802.86	2.7178	6.1303
35.0	242.562	0.00123498	1049.78	2802.74	2.7254	6.1245
35.5	243.378	0.00123677	1053.69	2802.61	2.7329	6.1188
36.0	244.186	0.00123855	1057.57	2802.47	2.7403	6.1131
36.5	244.986	0.00124032	1061.42	2802.31	2.7476	6.1075
37.0	245.776	0.00124209	1065.23	2802.15	2.7548	6.1019
37.5	246.559	0.00124385	1069.01	2801.97	2.7619	6.0964



## ANNEXES

38.0	247.334	0.00124560	1072.76	2801.78	2.7690	6.0910
38.5	248.101	0.00124735	1076.47	2801.57	2.7760	6.0856
39.0	248.861	0.00124910	1080.15	2801.36	2.7830	6.0802
39.5	249.613	0.00125084	1083.80	2801.13	2.7898	6.0749
40.0	250.358	0.00125257	1087.43	2800.90	2.7967	6.0697
40.5	251.095	0.00125430	1091.02	2800.65	2.8034	6.0645
41.0	251.826	0.00125602	1094.58	2800.39	2.8101	6.0594
41.5	252.550	0.00125774	1098.12	2800.13	2.8167	6.0543
42.0	253.267	0.00125946	1101.63	2799.85	2.8232	6.0492
42.5	253.978	0.00126117	1105.11	2799.57	2.8297	6.0442
43.0	254.683	0.00126288	1108.57	2799.27	2.8362	6.0393
43.5	255.381	0.00126458	1112.00	2798.97	2.8425	6.0343
44.0	256.073	0.00126628	1115.40	2798.65	2.8488	6.0294
44.5	256.759	0.00126797	1118.79	2798.33	2.8551	6.0246
45.0	257.439	0.00126966	1122.14	2798.00	2.8613	6.0198
45.5	258.114	0.00127135	1125.48	2797.66	2.8675	6.0150
46.0	258.783	0.00127304	1128.79	2797.31	2.8736	6.0103
46.5	259.446	0.00127472	1132.08	2796.95	2.8797	6.0056
47.0	260.104	0.00127639	1135.34	2796.59	2.8857	6.0010
47.5	260.757	0.00127807	1138.59	2796.21	2.8916	5.9963
48.0	261.404	0.00127974	1141.81	2795.83	2.8975	5.9917
48.5	262.046	0.00128141	1145.01	2795.44	2.9034	5.9872
49.0	262.683	0.00128308	1148.20	2795.04	2.9092	5.9827
49.5	263.316	0.00128474	1151.36	2794.64	2.9150	5.9782
50	263.943	0.00128641	1154.50	2794.23	2.9207	5.9737
51	265.183	0.00128972	1160.73	2793.38	2.9321	5.9649
52	266.405	0.00129303	1166.88	2792.51	2.9433	5.9562
53	267.610	0.00129633	1172.97	2791.60	2.9543	5.9475
54	268.797	0.00129962	1178.98	2790.67	2.9652	5.9390
55	269.967	0.00130291	1184.92	2789.72	2.9759	5.9307
56	271.121	0.00130619	1190.81	2788.74	2.9865	5.9224
57	272.260	0.00130947	1196.63	2787.73	2.9969	5.9141
58	273.383	0.00131274	1202.39	2786.70	3.0072	5.9060
59	274.492	0.00131601	1208.09	2785.64	3.0174	5.8980
60	275.586	0.00131927	1213.73	2784.56	3.0274	5.8901
61	276.667	0.00132253	1219.32	2783.46	3.0374	5.8822
62	277.734	0.00132579	1224.86	2782.33	3.0472	5.8744
63	278.788	0.00132905	1230.34	2781.19	3.0569	5.8667
64	279.830	0.00133231	1235.78	2780.02	3.0665	5.8591
65	280.859	0.00133557	1241.17	2778.83	3.0760	5.8515
66	281.876	0.00133882	1246.51	2777.62	3.0854	5.8440
67	282.881	0.00134208	1251.81	2776.39	3.0947	5.8366
68	283.875	0.00134534	1257.06	2775.13	3.1039	5.8292
69	284.858	0.00134860	1262.27	2773.86	3.1130	5.8219

## ANNEXES

70	285.830	0.00135186	1267.44	2772.57	3.1220	5.8146
71	286.791	0.00135512	1272.57	2771.26	3.1309	5.8074
72	287.743	0.00135839	1277.65	2769.93	3.1398	5.8003
73	288.684	0.00136165	1282.70	2768.58	3.1485	5.7932
74	289.615	0.00136493	1287.72	2767.21	3.1572	5.7862
75	290.537	0.00136820	1292.70	2765.82	3.1658	5.7792
76	291.449	0.00137149	1297.64	2764.41	3.1743	5.7722
77	292.352	0.00137477	1302.55	2762.99	3.1827	5.7653
78	293.247	0.00137806	1307.42	2761.55	3.1911	5.7584
79	294.132	0.00138136	1312.27	2760.09	3.1994	5.7516
80	295.009	0.00138466	1317.08	2758.61	3.2077	5.7448
81	295.878	0.00138797	1321.86	2757.12	3.2158	5.7381
82	296.738	0.00139129	1326.61	2755.60	3.2239	5.7314
83	297.591	0.00139461	1331.34	2754.07	3.2320	5.7247
84	298.435	0.00139795	1336.03	2752.52	3.2399	5.7181
85	299.272	0.00140129	1340.70	2750.96	3.2478	5.7115
86	300.102	0.00140464	1345.34	2749.38	3.2557	5.7050
87	300.924	0.00140799	1349.96	2747.78	3.2635	5.6984
88	301.738	0.00141136	1354.54	2746.16	3.2712	5.6919
89	302.546	0.00141474	1359.11	2744.53	3.2789	5.6855
90	303.347	0.00141812	1363.65	2742.88	3.2866	5.6790
91	304.141	0.00142152	1368.17	2741.22	3.2942	5.6726
92	304.928	0.00142493	1372.66	2739.53	3.3017	5.6662
93	305.709	0.00142834	1377.14	2737.83	3.3092	5.6598
94	306.483	0.00143177	1381.59	2736.12	3.3166	5.6535
95	307.251	0.00143522	1386.02	2734.38	3.3240	5.6472
96	308.013	0.00143867	1390.43	2732.64	3.3313	5.6409
97	308.768	0.00144214	1394.81	2730.87	3.3386	5.6346
98	309.518	0.00144562	1399.18	2729.09	3.3459	5.6283
99	310.262	0.00144911	1403.54	2727.29	3.3531	5.6221
100	310.999	0.00145262	1407.87	2725.47	3.3603	5.6159
105	314.606	0.00147038	1429.27	2716.14	3.3956	5.5850
110	318.081	0.00148855	1450.28	2706.39	3.4300	5.5545
115	321.436	0.00150718	1470.95	2696.21	3.4636	5.5243
120	324.678	0.00152633	1491.33	2685.58	3.4965	5.4941
125	327.816	0.00154607	1511.46	2674.49	3.5288	5.4640
130	330.857	0.00156649	1531.40	2662.89	3.5606	5.4339
135	333.806	0.00158766	1551.19	2650.77	3.5920	5.4036
140	336.669	0.00160971	1570.88	2638.09	3.6230	5.3730
145	339.452	0.00163276	1590.51	2624.81	3.6538	5.3422
150	342.158	0.00165696	1610.15	2610.86	3.6844	5.3108
155	344.792	0.00168249	1629.85	2596.22	3.7150	5.2789
160	347.357	0.00170954	1649.67	2580.80	3.7457	5.2463
165	349.856	0.00173833	1669.68	2564.57	3.7765	5.2129

## ANNEXES

---

170	352.293	0.00176934	1690.04	2547.41	3.8077	5.1785
175	354.671	0.00180286	1710.76	2529.11	3.8393	5.1428
180	356.992	0.00183949	1732.02	2509.53	3.8717	5.1055
185	359.258	0.00188000	1753.99	2488.41	3.9050	5.0663
190	361.471	0.00192545	1776.89	2465.41	3.9396	5.0246
195	363.633	0.00197747	1801.08	2440.00	3.9762	4.9795
200	365.746	0.00203865	1827.10	2411.39	4.0154	4.9299

# ANNEXES

## Annexe B :

### 1. les tables de vapeur

surchauffé P=20 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
220	0.102167	2821.67	6.3868
230	0.105394	2850.17	6.4440
240	0.108488	2877.21	6.4972
250	0.111484	2903.23	6.5474
260	0.114400	2928.47	6.5952
270	0.117251	2953.09	6.6410
280	0.120046	2977.21	6.6850
290	0.122794	3000.90	6.7274
300	0.125501	3024.25	6.7685
310	0.128174	3047.32	6.8084
320	0.130816	3070.16	6.8472
330	0.133431	3092.80	6.8851
340	0.136023	3115.28	6.9221
350	0.138594	3137.64	6.9582
360	0.141147	3159.89	6.9937
370	0.143683	3182.06	7.0284
380	0.146205	3204.16	7.0625
390	0.148712	3226.21	7.0960
400	0.151208	3248.23	7.1290
410	0.153693	3270.21	7.1614
420	0.156167	3292.18	7.1933
430	0.158632	3314.14	7.2248
440	0.161088	3336.09	7.2558
450	0.163537	3358.05	7.2863
460	0.165978	3380.02	7.3165
470	0.168413	3402.01	7.3463
480	0.170841	3424.01	7.3757
490	0.173263	3446.04	7.4048
500	0.175680	3468.09	7.4335
510	0.178092	3490.18	7.4619
520	0.180499	3512.30	7.4899
530	0.182902	3534.45	7.5177
540	0.185300	3556.64	7.5451
550	0.187694	3578.88	7.5723
560	0.190085	3601.15	7.5992
570	0.192472	3623.47	7.6258

P=30 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
240	0.0682274	2824.56	6.2275
250	0.0706225	2856.55	6.2893
260	0.0728884	2886.42	6.3458
270	0.0750596	2914.84	6.3987
280	0.0771560	2942.16	6.4485
290	0.0791913	2968.61	6.4959
300	0.0811753	2994.35	6.5412
310	0.0831160	3019.51	6.5847
320	0.0850197	3044.18	6.6267
330	0.0868914	3068.46	6.6673
340	0.0887354	3092.40	6.7066
350	0.0905550	3116.06	6.7449
360	0.0923533	3139.49	6.7822
370	0.0941327	3162.73	6.8186
380	0.0958952	3185.80	6.8542
390	0.0976427	3208.74	6.8891
400	0.0993766	3231.57	6.9233
410	0.101098	3254.31	6.9568
420	0.102809	3276.97	6.9897
430	0.104510	3299.58	7.0221
440	0.106201	3322.14	7.0540
450	0.107884	3344.66	7.0853
460	0.109559	3367.16	7.1162
470	0.111227	3389.64	7.1467
480	0.112888	3412.10	7.1767
490	0.114544	3434.57	7.2063
500	0.116193	3457.04	7.2356
510	0.117837	3479.52	7.2645
520	0.119476	3502.01	7.2930
530	0.121111	3524.51	7.3212
540	0.122741	3547.04	7.3491
550	0.124367	3569.59	7.3767
560	0.125990	3592.17	7.4039
570	0.127608	3614.78	7.4309
580	0.129224	3637.42	7.4576
590	0.130836	3660.09	7.4840

## ANNEXES

580	0.194856	3645.84	7.6522
590	0.197237	3668.25	7.6783
600	0.199614	3690.71	7.7042
650	0.211464	3803.79	7.8301
700	0.223260	3918.24	7.9509
750	0.235015	4034.16	8.0670
800	0.246737	4151.59	8.1791

600	0.132445	3682.81	7.5102
650	0.140451	3796.99	7.6373
700	0.148403	3912.34	7.7590
750	0.156312	4028.99	7.8759
800	0.164189	4147.03	7.9885

P=40 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
260	0.0517770	2837.19	6.1384
270	0.0536916	2871.20	6.2016
280	0.0554948	2902.88	6.2594
290	0.0572145	2932.91	6.3132
300	0.0588680	2961.65	6.3638
310	0.0604671	2989.38	6.4118
320	0.0620211	3016.28	6.4575
330	0.0635367	3042.49	6.5014
340	0.0650195	3068.14	6.5435
350	0.0664740	3093.32	6.5843
360	0.0679040	3118.10	6.6237
370	0.0693123	3142.55	6.6620
380	0.0707017	3166.71	6.6993
390	0.0720743	3190.64	6.7357
400	0.0734318	3214.37	6.7712
410	0.0747759	3237.94	6.8059
420	0.0761079	3261.36	6.8400
430	0.0774290	3284.66	6.8734
440	0.0787401	3307.87	6.9061
450	0.0800422	3330.99	6.9383
460	0.0813360	3354.05	6.9700
470	0.0826222	3377.05	7.0012
480	0.0839015	3400.01	7.0318
490	0.0851742	3422.94	7.0621
500	0.0864410	3445.84	7.0919
510	0.0877022	3468.72	7.1213
520	0.0889583	3491.60	7.1503
530	0.0902096	3514.47	7.1790
540	0.0914564	3537.34	7.2073
550	0.0926990	3560.22	7.2353
560	0.0939376	3583.11	7.2629

P=50 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
270	0.0405675	2819.84	6.0211
280	0.0422746	2858.08	6.0909
290	0.0438562	2893.00	6.1535
300	0.0453466	2925.64	6.2109
310	0.0467667	2956.58	6.2645
320	0.0481304	2986.18	6.3148
330	0.0494477	3014.71	6.3625
340	0.0507261	3042.36	6.4080
350	0.0519714	3069.29	6.4515
360	0.0531884	3095.62	6.4934
370	0.0543809	3121.44	6.5339
380	0.0555520	3146.83	6.5731
390	0.0567042	3171.86	6.6111
400	0.0578398	3196.59	6.6481
410	0.0589607	3221.06	6.6842
420	0.0600683	3245.31	6.7194
430	0.0611641	3269.37	6.7539
440	0.0622491	3293.27	6.7877
450	0.0633245	3317.03	6.8208
460	0.0643910	3340.68	6.8532
470	0.0654495	3364.24	6.8851
480	0.0665006	3387.71	6.9165
490	0.0675449	3411.12	6.9474
500	0.0685829	3434.48	6.9778
510	0.0696152	3457.79	7.0078
520	0.0706420	3481.06	7.0373
530	0.0716639	3504.31	7.0664
540	0.0726812	3527.54	7.0952
550	0.0736941	3550.75	7.1235
560	0.0747029	3573.96	7.1516
570	0.0757080	3597.17	7.1793

## ANNEXES

570	0.0951726	3606.01	7.2902
580	0.0964041	3628.93	7.3172
590	0.0976323	3651.88	7.3440
600	0.0988574	3674.85	7.3704
650	0.104943	3790.15	7.4989
700	0.110973	3906.41	7.6215
750	0.116961	4023.80	7.7391
800	0.122915	4142.46	7.8523

580	0.0767095	3620.38	7.2066
590	0.0777077	3643.60	7.2337
600	0.0787027	3666.83	7.2604
650	0.0836367	3783.28	7.3901
700	0.0885146	3900.45	7.5137
750	0.0933495	4018.59	7.6321
800	0.0981510	4137.87	7.7459

P=60 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
280	0.0331998	2805.25	5.9276
290	0.0347631	2847.50	6.0033
300	0.0361911	2885.49	6.0702
310	0.0375230	2920.58	6.1309
320	0.0387819	2953.55	6.1870
330	0.0399833	2984.87	6.2393
340	0.0411378	3014.89	6.2887
350	0.0422535	3043.86	6.3356
360	0.0433364	3071.96	6.3803
370	0.0443912	3099.33	6.4232
380	0.0454220	3126.10	6.4645
390	0.0464317	3152.36	6.5044
400	0.0474230	3178.18	6.5431
410	0.0483980	3203.64	6.5806
420	0.0493586	3228.79	6.6171
430	0.0503063	3253.66	6.6528
440	0.0512425	3278.31	6.6876
450	0.0521683	3302.76	6.7216
460	0.0530847	3327.05	6.7550
470	0.0539925	3351.19	6.7877
480	0.0548925	3375.21	6.8198
490	0.0557854	3399.12	6.8513
500	0.0566717	3422.95	6.8824
510	0.0575519	3446.70	6.9129
520	0.0584266	3470.39	6.9429
530	0.0592960	3494.03	6.9726
540	0.0601607	3517.63	7.0018
550	0.0610209	3541.19	7.0306
560	0.0618769	3564.73	7.0590

P=70 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
290	0.0280439	2793.98	5.8528
300	0.0294938	2839.83	5.9335
310	0.0308034	2880.57	6.0040
320	0.0320146	2917.86	6.0674
330	0.0331520	2952.63	6.1255
340	0.0342317	2985.50	6.1796
350	0.0352650	3016.85	6.2303
360	0.0362600	3046.99	6.2783
370	0.0372229	3076.13	6.3240
380	0.0381585	3104.44	6.3677
390	0.0390705	3132.07	6.4096
400	0.0399621	3159.10	6.4501
410	0.0408358	3185.65	6.4892
420	0.0416938	3211.77	6.5272
430	0.0425378	3237.53	6.5641
440	0.0433694	3262.98	6.6000
450	0.0441898	3288.17	6.6351
460	0.0450001	3313.13	6.6694
470	0.0458014	3337.89	6.7029
480	0.0465944	3362.48	6.7358
490	0.0473799	3386.93	6.7681
500	0.0481585	3411.25	6.7997
510	0.0489308	3435.46	6.8308
520	0.0496972	3459.59	6.8614
530	0.0504583	3483.63	6.8916
540	0.0512144	3507.61	6.9212
550	0.0519658	3531.53	6.9505
560	0.0527130	3555.41	6.9793
570	0.0534561	3579.25	7.0078

## ANNEXES

570	0.0627290	3588.25	7.0870
580	0.0635775	3611.76	7.1148
590	0.0644225	3635.26	7.1421
600	0.0652644	3658.76	7.1692
650	0.0694316	3776.36	7.3002
700	0.0735419	3894.47	7.4248
750	0.0776087	4013.37	7.5439
800	0.0816416	4133.27	7.6583

580	0.0541955	3603.06	7.0358
590	0.0549314	3626.85	7.0635
600	0.0556641	3650.62	7.0909
650	0.0592843	3769.41	7.2232
700	0.0628467	3888.46	7.3488
750	0.0663652	4008.12	7.4687
800	0.0698494	4128.65	7.5837

P=80 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
300	0.0242802	2786.38	5.7935
310	0.0256318	2835.27	5.8781
320	0.0268425	2878.35	5.9514
330	0.0279551	2917.53	6.0169
340	0.0289946	2953.87	6.0766
350	0.0299776	2988.06	6.1319
360	0.0309152	3020.57	6.1837
370	0.0318155	3051.73	6.2325
380	0.0326848	3081.79	6.2789
390	0.0335276	3110.93	6.3232
400	0.0343477	3139.31	6.3657
410	0.0351482	3167.04	6.4066
420	0.0359315	3194.23	6.4461
430	0.0366996	3220.95	6.4843
440	0.0374543	3247.26	6.5215
450	0.0381970	3273.23	6.5577
460	0.0389290	3298.91	6.5929
470	0.0396513	3324.33	6.6274
480	0.0403649	3349.53	6.6611
490	0.0410706	3374.53	6.6940
500	0.0417691	3399.37	6.7264
510	0.0424609	3424.07	6.7581
520	0.0431467	3448.64	6.7893
530	0.0438269	3473.11	6.8199
540	0.0445019	3497.48	6.8501
550	0.0451721	3521.77	6.8798
560	0.0458379	3546.00	6.9091
570	0.0464996	3570.17	6.9379
580	0.0471574	3594.29	6.9663
590	0.0478117	3618.37	6.9944
600	0.0484625	3642.42	7.0221

P=90 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
310	0.0214493	2782.61	5.7475
320	0.0227102	2833.89	5.8348
330	0.0238335	2878.87	5.9100
340	0.0248613	2919.58	5.9769
350	0.0258184	2957.22	6.0378
360	0.0267208	2992.53	6.0940
370	0.0275795	3026.01	6.1465
380	0.0284025	3058.05	6.1959
390	0.0291956	3088.89	6.2428
400	0.0299635	3118.75	6.2875
410	0.0307096	3147.79	6.3303
420	0.0314369	3176.13	6.3715
430	0.0321478	3203.88	6.4113
440	0.0328442	3231.13	6.4497
450	0.0335278	3257.94	6.4871
460	0.0341999	3284.38	6.5234
470	0.0348618	3310.50	6.5588
480	0.0355145	3336.33	6.5933
490	0.0361587	3361.93	6.6271
500	0.0367955	3387.31	6.6601
510	0.0374252	3412.51	6.6925
520	0.0380487	3437.55	6.7243
530	0.0386664	3462.45	6.7555
540	0.0392787	3487.23	6.7861
550	0.0398860	3511.91	6.8163
560	0.0404888	3536.49	6.8460
570	0.0410873	3561.00	6.8752
580	0.0416819	3585.44	6.9040
590	0.0422728	3609.83	6.9324
600	0.0428602	3634.16	6.9605
650	0.0457529	3755.39	7.0955

## ANNEXES

650	0.0516732	3762.42	7.1557
700	0.0548251	3882.42	7.2823
750	0.0579325	4002.86	7.4030
800	0.0610054	4124.02	7.5186

700	0.0485859	3876.36	7.2231
750	0.0513738	3997.58	7.3446
800	0.0541269	4119.38	7.4608

P=100 [bar]

P=120 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
320	0.0192716	2782.66	5.7131
330	0.0204462	2835.67	5.8017
340	0.0214897	2882.06	5.8780
350	0.0224422	2923.96	5.9458
360	0.0233274	2962.61	6.0073
370	0.0241605	2998.82	6.0641
380	0.0249522	3033.11	6.1170
390	0.0257099	3065.87	6.1668
400	0.0264393	3097.38	6.2139
410	0.0271447	3127.85	6.2589
420	0.0278294	3157.45	6.3019
430	0.0284963	3186.32	6.3432
440	0.0291475	3214.57	6.3831
450	0.0297850	3242.28	6.4217
460	0.0304102	3269.53	6.4591
470	0.0310246	3296.38	6.4955
480	0.0316292	3322.89	6.5310
490	0.0322250	3349.11	6.5655
500	0.0328129	3375.06	6.5993
510	0.0333935	3400.78	6.6324
520	0.0339675	3426.31	6.6648
530	0.0345355	3451.67	6.6965
540	0.0350979	3476.87	6.7277
550	0.0356552	3501.94	6.7584
560	0.0362078	3526.90	6.7885
570	0.0367561	3551.75	6.8182
580	0.0373002	3576.52	6.8474
590	0.0378406	3601.22	6.8761
600	0.0383775	3625.84	6.9045
650	0.0410163	3748.32	7.0409
700	0.0435944	3870.27	7.1696
750	0.0461269	3992.28	7.2918
800	0.0486242	4114.73	7.4087

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
330	0.0150236	2728.14	5.5650
340	0.0162112	2793.47	5.6725
350	0.0172227	2848.01	5.7607
360	0.0181226	2895.87	5.8369
370	0.0189442	2939.15	5.9047
380	0.0197077	2979.09	5.9664
390	0.0204258	3016.49	6.0232
400	0.0211077	3051.90	6.0762
410	0.0217597	3085.70	6.1261
420	0.0223867	3118.19	6.1733
430	0.0229924	3149.59	6.2182
440	0.0235799	3180.07	6.2613
450	0.0241515	3209.77	6.3027
460	0.0247091	3238.81	6.3425
470	0.0252545	3267.28	6.3811
480	0.0257890	3295.25	6.4185
490	0.0263138	3322.79	6.4548
500	0.0268298	3349.97	6.4902
510	0.0273378	3376.81	6.5247
520	0.0278387	3403.37	6.5584
530	0.0283331	3429.69	6.5914
540	0.0288215	3455.78	6.6237
550	0.0293045	3481.68	6.6553
560	0.0297824	3507.41	6.6864
570	0.0302557	3533.00	6.7169
580	0.0307247	3558.45	6.7469
590	0.0311897	3583.78	6.7764
600	0.0316511	3609.02	6.8055
650	0.0339104	3734.07	6.9448
700	0.0361069	3858.03	7.0756
750	0.0382567	3981.64	7.1994
800	0.0403706	4105.40	7.3175



## ANNEXES

P=140 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
340	0.0119989	2672.38	5.4291
350	0.0132316	2752.92	5.5595
360	0.0142288	2816.39	5.6605
370	0.0150919	2870.38	5.7452
380	0.0158666	2918.26	5.8190
390	0.0165779	2961.83	5.8853
400	0.0172410	3002.23	5.9457
410	0.0178661	3040.16	6.0017
420	0.0184603	3076.14	6.0539
430	0.0190290	3110.53	6.1032
440	0.0195762	3143.61	6.1499
450	0.0201049	3175.60	6.1945
460	0.0206177	3206.66	6.2371
470	0.0211167	3236.94	6.2782
480	0.0216034	3266.54	6.3177
490	0.0220794	3295.55	6.3560
500	0.0225457	3324.06	6.3931
510	0.0230034	3352.13	6.4292
520	0.0234533	3379.81	6.4643
530	0.0238961	3407.15	6.4986
540	0.0243326	3434.20	6.5320
550	0.0247632	3460.99	6.5648
560	0.0251885	3487.54	6.5968
570	0.0256089	3513.89	6.6283
580	0.0260247	3540.06	6.6591
590	0.0264364	3566.07	6.6894
600	0.0268442	3591.94	6.7192
650	0.0288338	3719.67	6.8615
700	0.0307586	3845.69	6.9944
750	0.0326354	3970.94	7.1200
800	0.0344758	4096.02	7.2393

P=160 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
350	0.00976565	2616.99	5.3045
360	0.0110599	2715.63	5.4616
370	0.0120464	2788.30	5.5755
380	0.0128781	2848.27	5.6680
390	0.0136131	2900.49	5.7474
400	0.0142810	2947.46	5.8177
410	0.0148991	2990.62	5.8814
420	0.0154783	3030.88	5.9399
430	0.0160263	3068.85	5.9943
440	0.0165486	3104.99	6.0453
450	0.0170494	3139.61	6.0935
460	0.0175320	3172.98	6.1393
470	0.0179988	3205.29	6.1831
480	0.0184520	3236.70	6.2251
490	0.0188931	3267.34	6.2655
500	0.0193237	3297.31	6.3045
510	0.0197449	3326.71	6.3423
520	0.0201577	3355.60	6.3790
530	0.0205628	3384.05	6.4146
540	0.0209611	3412.12	6.4494
550	0.0213532	3439.85	6.4832
560	0.0217396	3467.28	6.5164
570	0.0221208	3494.44	6.5488
580	0.0224972	3521.37	6.5805
590	0.0228693	3548.08	6.6117
600	0.0232373	3574.61	6.6422
650	0.0250259	3705.11	6.7876
700	0.0267475	3833.26	6.9228
750	0.0284200	3960.18	7.0499
800	0.0300554	4086.62	7.1706

## ANNEXES

P=180 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
360	0.00810999	2566.03	5.1950
370	0.00945130	2683.67	5.3795
380	0.0104189	2764.89	5.5048
390	0.0112174	2830.24	5.6041
400	0.0119147	2886.31	5.6881
410	0.0125434	2936.27	5.7618
420	0.0131220	2981.89	5.8281
430	0.0136617	3024.21	5.8887
440	0.0141706	3063.96	5.9448
450	0.0146541	3101.65	5.9973
460	0.0151165	3137.66	6.0468
470	0.0155610	3172.26	6.0936
480	0.0159901	3205.69	6.1383
490	0.0164060	3238.12	6.1811
500	0.0168102	3269.69	6.2222
510	0.0172042	3300.53	6.2618
520	0.0175890	3330.73	6.3002
530	0.0179656	3360.38	6.3373
540	0.0183350	3389.54	6.3734
550	0.0186977	3418.27	6.4085
560	0.0190544	3446.62	6.4427
570	0.0194055	3474.64	6.4762
580	0.0197517	3502.36	6.5089
590	0.0200933	3529.82	6.5408
600	0.0204306	3557.04	6.5722
650	0.0220638	3690.42	6.7208
700	0.0236279	3820.74	6.8583
750	0.0251418	3949.37	6.9872
800	0.0266179	4077.18	7.1091

P=200 [bar]

T [c°]	V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	S <sub>g</sub> [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
370	0.00692374	2526.48	5.1095
380	0.00825779	2659.19	5.3144
390	0.00918976	2747.17	5.4482
400	0.00994958	2816.84	5.5525
410	0.0106082	2876.05	5.6398
420	0.0111994	2928.51	5.7160
430	0.0117416	2976.18	5.7843
440	0.0122459	3020.26	5.8466
450	0.0127202	3061.53	5.9041
460	0.0131699	3100.57	5.9577
470	0.0135992	3137.77	6.0081
480	0.0140113	3173.45	6.0558
490	0.0144085	3207.86	6.1012
500	0.0147929	3241.19	6.1445
510	0.0151662	3273.59	6.1862
520	0.0155296	3305.21	6.2263
530	0.0158842	3336.13	6.2650
540	0.0162309	3366.45	6.3026
550	0.0165707	3396.24	6.3390
560	0.0169040	3425.57	6.3744
570	0.0172316	3454.49	6.4089
580	0.0175539	3483.05	6.4426
590	0.0178714	3511.28	6.4755
600	0.0181844	3539.23	6.5077
650	0.0196942	3675.59	6.6596
700	0.0211327	3808.15	6.7994
750	0.0225198	3938.52	6.9301
800	0.0238685	4067.73	7.0534

## ANNEXES

---

P=220 [bar]

T [c°]	$V_g$ [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	$h_g$ [kJ/kg]	$s_g$ [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
380	0.00612498	2504.56	5.0556
390	0.00737736	2643.66	5.2671
400	0.00825503	2735.76	5.4050
410	0.00896956	2808.37	5.5121
420	0.00958798	2869.89	5.6015
430	0.0101423	2924.25	5.6794
440	0.0106498	2973.55	5.7491
450	0.0111214	3019.05	5.8124
460	0.0115644	3061.57	5.8708
470	0.0119839	3101.72	5.9252
480	0.0123840	3139.92	5.9763
490	0.0127675	3176.52	6.0246
500	0.0131370	3211.77	6.0704
510	0.0134943	3245.88	6.1143
520	0.0138410	3279.01	6.1563
530	0.0141782	3311.30	6.1968
540	0.0145070	3342.86	6.2358
550	0.0148284	3373.78	6.2736
560	0.0151431	3404.14	6.3103
570	0.0154516	3434.01	6.3459
580	0.0157547	3463.44	6.3806
590	0.0160527	3492.48	6.4145
600	0.0163461	3521.18	6.4475
650	0.0177555	3660.64	6.6029
700	0.0190916	3795.49	6.7451
750	0.0203752	3927.63	6.8776
800	0.0216197	4058.25	7.0022

## ANNEXES

### 2. les tables de vapeur surchauffé avec pression supercritique

P=240 [bar]

T [c°]	$V_g$ [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	$h_g$ [kJ/kg]	$S_g$ [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
550	0.0133751	3350.89	6.2116
560	0.0136745	3382.33	6.2496
570	0.0139675	3413.19	6.2864
580	0.0142547	3443.54	6.3222
590	0.0145367	3473.43	6.3570
600	0.0148139	3502.91	6.3910
650	0.0161403	3645.56	6.5499
700	0.0173913	3782.76	6.6946
750	0.0185887	3916.71	6.8289
800	0.0197464	4048.76	6.9549

P=260 [bar]

T [c°]	$V_g$ [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	$h_g$ [kJ/kg]	$S_g$ [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
550	0.0121444	3327.58	6.1523
560	0.0124312	3360.17	6.1917
570	0.0127112	3392.07	6.2297
580	0.0129853	3423.37	6.2666
590	0.0132538	3454.13	6.3025
600	0.0135174	3484.42	6.3374
650	0.0147740	3630.36	6.5000
700	0.0159531	3769.97	6.6473
750	0.0170777	3905.75	6.7833
800	0.0181620	4039.25	6.9107

P=280 [bar]

T [c°]	$V_g$ [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	$h_g$ [kJ/kg]	$S_g$ [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
550	0.0110891	3303.87	6.0953
560	0.0113653	3337.65	6.1361
570	0.0116344	3370.64	6.1755
580	0.0118973	3402.93	6.2136
590	0.0121545	3434.61	6.2505
600	0.0124065	3465.74	6.2863
650	0.0136035	3615.07	6.4527
700	0.0147212	3757.13	6.6026
750	0.0157832	3894.78	6.7405
800	0.0168046	4029.74	6.8693

P=300 [bar]

T [c°]	$V_g$ [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ]	$h_g$ [kJ/kg]	$S_g$ [kJ/kg K <sup>-1</sup> ]
550	0.0101745	3279.79	6.0403
560	0.0104416	3314.82	6.0826
570	0.0107014	3348.94	6.1233
580	0.0109547	3382.25	6.1626
590	0.0112021	3414.87	6.2006
600	0.0114442	3446.87	6.2374
650	0.0125897	3599.68	6.4077
700	0.0136542	3744.24	6.5602
750	0.0146621	3883.78	6.7000
800	0.0156288	4020.23	6.8303

## RESUME

### Résumé

Ce travail de mémoire est axé sur l'étude de l'influence de la surchauffe sur les installations thermiques à vapeur.

L'influence de la pression dans le condenseur, la pression dans la chaudière et la température de surchauffe sur les performances de fonctionnement de cycle de Rankine surchauffé est présentée. Le programme MATLAB est amélioré pour cet objectif.

Les résultats des calculs montrent que l'augmentation de la pression dans le condenseur est accompagnée par une diminution de rendement thermique de cycle. L'augmentation de la pression dans la chaudière et la température de surchauffé est accompagnée par une augmentation de rendement thermique. Le cycle surchauffé procède de rendement thermique plus élevé par rapport au cycle simple. Le cycle de Rankine surchauffé est très sensible à l'irréversibilité des transformations thermodynamique.

### الملخص

يركز هذا العمل على دراسة المقارنة تأثير ارتفاع في درجة تسخين على المنشآت الحرارية البخارية .  
تأثير الضغط في المكثف، الضغط الأقصى والضغط الوسطي في مولد البخار و درجة حرارة اعادة التسخين على المردود الحراري لدورة رانكين ذو إعادة التسخين ولهذا الغرض نستعمل برنامج ما تلاب موسع .  
تظهر النتائج العملية الحسابية أن زيادة الضغط في المكثف يرافقه انخفاض في المردود الحراري للدورة وزيادة الضغط في مولد البخار ودرجة حرارة في اعادة التسخين يرافقه ارتفاع في المردود الحراري. وتتميز دورة إعادة التسخين بمردود حراري مرتفع مقارنة بدورة بسيطة.  
دورة رانكين عالية التسخين حساسة جدا على التحولات الترموديناميكية .