



N° Ref:.....

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de*  
**MASTER**  
*Spécialité : mécanique énergétique*  
**THEME**

*Analyse thermodynamique des performances d'une  
installation de turbine à vapeur à l'aide du logiciel EES  
(Engineering Equation Solver)*

*Réalisé par :*

- *Meghzili Fouzi*
- *Fergani Fayssal*

*Soutenu devant le jury :*

**L. HASSINET**  
**A. BOUBGHEL**  
**M. BENSOUICI**

*Président*  
*Examineur*  
*Rapporteur*

*Année universitaire : 2020/2021*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Nous remercions tout d'abord **ALLAH** le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.*

*Nous tenons à exprimé toute reconnaissance à nos professeur **Docteur Bensouici Moumtez**, encadreur de ce mémoire Nous le remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*Nous adressons mes sincères remerciement a tous les professeurs intervenantes et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nos rencontrer durant nos études*

*Je tiens à remercier le **Président du Jury** et Mes sincères remerciements vont également à tous les membres de jury, qui font l'honneur de juger mon modeste travail.*

Dédicaces

Je dédie ce mémoire en particulier

Au prophète Mohammed (ص)

A mes très chers parents

A mes chers frères et sœurs

A toute ma grande famille

*À mon binôme* qui j'ai partagé avec lui  
les bons et *les durs moments*

Et enfin à tous mes collègues et mes  
amis .

## ملخص

في هذا العمل، نقدم تحليل ديناميكي حراري لأداء دورة Hirn المثالية البسيطة لتوربينات بخارية باستخدام برنامج حساب EES (حلل المعادلات الهندسية) مع دراسة التأثيرات على أداء دورة Hirn، والتي هي التأثير درجة الحرارة عند مدخل التوربين وتأثير الضغط في المكثف. تم تحسين الكفاءة الحرارية لدورة Hirn (رانكين فائقة التسخين) بالفعل من خلال زيادة درجة الحرارة عند مدخل التوربين، ولكن على العكس من ذلك، فإن الزيادة في ضغط المكثف تؤثر سلباً على كفاءة الدورة.

**الكلمات المفتاحية:** التوربين البخاري، دورة هيرن المثالية، برنامج EES

## Abstract

In this work we present a thermodynamic analysis of the performance of simple idealized Hirn cycle of a steam turbine using the EES calculation program (Engineering Equation Solver) with a study of the effects on the performance of the Hirn cycle, which is the effect of temperature at the inlet of the turbine and the effect of pressure in the condenser. The Hirn (Superheated Rankine) cycle does improve thermal efficiency by increasing the temperature at the turbine inlet, but on the contrary increasing the condenser pressure affects negatively on the cycle efficiency.

**Keywords:** Steam turbine, ideal Hirn cycle, EES software.

## Résumé

Dans ce travail, nous présentons une analyse thermodynamique des performances du cycle de Hirn idéalisé simple d'une turbine à vapeur, en utilisant le programme de calcul EES (Engineering Equation Solver) avec une étude des effets sur les performances du cycle de Hirn, qui est l'effet de la température à l'entrée de la turbine et l'effet de la pression dans le condenseur. Le cycle de Hirn (Rankine surchauffé) améliore le rendement thermique par l'augmentation de la température à l'entrée de la turbine, mais au contraire l'augmentation de la pression du condenseur affecte négativement le rendement du cycle.

Mots clés : Turbine à vapeur, cycle de Hirn idéal, logiciel EES.

## Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	II
ملخص	IV
Abstract	V
Résumé	VI
Nomenclature	IX
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
Introduction générale	2
<b>Chapitre I Généralités sur les turbines à vapeur</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction	5
I.2 Définition de la turbine à vapeur	5
I.3 Historique sur les turbines à vapeur	6
I.4 principaux composants des turbines à vapeur	7
I.5 Types de turbines à vapeur	8
I.6 Avantages d'une turbine à vapeur	9
I.7 Inconvénients	10
<b>Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn de turbine à vapeur (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES</b>	<b>12</b>
II.1 Introduction	12
II.2 Cycles thermodynamiques étudiés de la turbine à vapeur	12
II.2.1 Cycle de Rankine de base	12
II.2.2 Cycle de Rankine à surchauffe (Cycle de Hirn)	14

II.3 Description de l'logiciel EES	17
II.3.1 Définition de l'logiciel EES	17
II.3.2 Information générale	17
II.3.3 Exploration du menu principal	17
II.3.4 Fenêtres de EES	18
II.3.5 Menus principaux de logiciel EES	22
<b>Chapitre III: Résultats et discussions</b>	
III.1 Introduction	29
III.2 Résultats et discussions	29
III.2.1 Etude des performances du cycle de Rankine avec surchauffe (cycle de Hirn) avec le logiciel EES	29
Conclusion générale	43
Références bibliographiques	45

## NOMENCLATURE

$C_p$	Capacité calorifique du fluide à pression constante [kJ/kg. K]
$C_v$	Capacité calorifique du fluide à volume constante [kJ/kg. K]
$p$	Pression [Pa]
$Q_{in}$	Energie entrante [kJ/kg]
$Q_{out}$	Energie sortante (perdus) [kJ/kg]
$R$	Constante des gaz parfaits [kJ/kg. K]
$T$	Temperature [K]
$T_3$	Température à l'entrée de la turbine [K]
$W_c$	Travail du compresseur [kJ/kg]
$W_{net}$	Travail net du cycle [kJ/kg]
$W_t$	Travail de la turbine [kJ/kg]
Symboles grecs	
$\eta_{th}$	Rendement thermique du cycle [%]

## Liste des figures

<b>Figure (I.1)</b>	Centrale thermiques de production d'électricité par turbine à vapeur.	4
<b>Figure (I.2)</b>	Turbine à impulsion.	9
<b>Figure (I.3)</b>	Turbine à réaction.	9
<b>Figure (II.1)</b>	Schéma simplifié d'une turbine à vapeur	12
<b>Figure (II.2)</b>	Diagramme T-S du cycle de Rankine.	13
<b>Figure (II.3)</b>	Schéma simplifié d'une turbine à vapeur avec surchauffe.	15
<b>Figure (II.4)</b>	Diagramme T-S du cycle de Rankine à surchauffe (hirm idéal).	15
<b>Figure (II.5)</b>	Fenêtre des Informations général.	17
<b>Figure (II.6)</b>	Interface du logiciel EES.	18
<b>Figure (II.7)</b>	Interface de la fenêtre de mise en forme d'équations.	18
<b>Figure (II.8)</b>	Interface d'un exemple d'équation sur La fenêtre de mise en forme d'équations.	19
<b>Figure (II.9)</b>	Façade de la fenêtre de solution.	19
<b>Figure (II.10)</b>	Interface de La fenêtre Tableaux.	20
<b>Figure (II.11)</b>	Fenêtre Résiduelle.	20
<b>Figure (II.12)</b>	Fenêtre de la table paramétrique.	21
<b>Figure (II.13)</b>	Fenêtre 'Lookup Table'.	21
<b>Figure (II.14)</b>	Menu Options.	22
<b>Figure (II.15)</b>	Boite de dialogue.	22
<b>Figure (II.16)</b>	Fenêtre 'Unit Conversion Info'	23
<b>Figure (II.17)</b>	Menu de calculs.	23
<b>Figure (II.18)</b>	Menu Tables.	23
<b>Figure (II.19)</b>	Interface de 'Alter Values'.	24
<b>Figure (II.20)</b>	Menu Plot.	24
<b>Figure (II.21)</b>	Interface de ' add text '.	25
<b>Figure (II.22)</b>	Menu Windows.	26
<b>Figure (II.23)</b>	Menu Help.	27

<b>Figure (III.1)</b>	Diagramme T-S de cycle de Hirn.	31
<b>Figure (III.2)</b>	Diagramme T-S de Rankine à surchauffe avec changement de la température à l'entrée de la turbine.	33
<b>Figure (III.3)</b>	Energie thermique entrante en fonction de température à l'entrée de la turbine.	33
<b>Figure (III.4)</b>	Energie thermique perdue en fonction de température à l'entrée de la turbine.	34
<b>Figure (III.5)</b>	Travail net en fonction de température à l'entrée de la turbine.	35
<b>Figure (III.6)</b>	Travail de la turbine en fonction de la température à l'entrée de la turbine.	35
<b>Figure (III.7)</b>	Travail de la pompe en fonction de température à l'entrée de la turbine.	36
<b>Figure (III.8)</b>	Rendement thermique en fonction de température à l'entrée de la turbine.	36
<b>Figure (III.9)</b>	Diagramme T-S de Hirn avec changement de pression dans le condenseur.	37
<b>Figure (III.10)</b>	Energie thermique entrante en fonction de la pression dans le condenseur	38
<b>Figure (III.11)</b>	Energie thermique perdue en fonction de la pression dans le condenseur.	38
<b>Figure (III.12)</b>	Travail net en fonction de la pression dans le condenseur.	39
<b>Figure (III.13)</b>	Travail de la turbine en fonction de la pression dans le condenseur.	40
<b>Figure (III.14)</b>	Travail de la pompe en fonction de la pression dans le condenseur.	40
<b>Figure (III.15)</b>	Rendement thermique en fonction de la pression dans le condenseur.	41

## Liste des tableaux

<b>Tableau(III.1)</b>	Points du cycle de Hirn.	32
<b>Tableau(III.2)</b>	Performances du cycle de Hirn en fonction de Température à l'entrée de la turbine.	32
<b>Tableau(III.3)</b>	Performances du cycle de Hirn en fonction de la pression dans le condenseur.	37

***Introduction générale***

# Introduction générale

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue pour répondre à la consommation croissante d'électricité. La nécessité de la production d'énergie électrique est apparue au début de 19<sup>e</sup> siècle, jour après jour, cette nécessité est devenue plus importante avec l'évolution de la technologie et la démographie. Pour produire cette énergie, l'homme a poursuivi plusieurs méthodes, en partant des centrales électriques hydraulique, thermique, éoliennes, nucléaire, géothermique et solaire, Le choix du type de l'énergie primaire utilisée par la centrale est déterminé par un calcul économique faisant intervenir les coûts d'investissement d'une part, et les coûts d'exploitation et d'entretien d'autre part. Et notre pays, étant en voie de développement, a déjà accédé à ce secteur par la création des centrales thermique de la production de cette énergie, parmi ces installations: les turbines à gaz, les turbines à vapeur, cycles combiné.....etc.

La turbine à vapeur est capable de produire de l'électricité en grande quantité, donc avec l'avènement de la révolution industrielle, l'idée d'exploiter l'énergie de la vapeur a évolué avec le développement de la thermodynamique et de la mécanique des fluides, ainsi les turbines à vapeur conquirent le marché et s'octroyèrent le rôle de producteur massif d'énergie. Les turbines à vapeur, comme toutes les turbomachines (et contrairement aux machines volumétriques), 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 (pouvant dépasser un million de kilowatts), et cela avec un rendement élevé et avec toute la souplesse de réglage exigée par le fonctionnement des centrales électriques modernes. De plus, les turbines à vapeur se prêtent, dans des conditions économiques, à la production simultanée d'énergie électrique et de chaleur. Pour toutes ces raisons, ces machines jouent un rôle de tout premier plan dans la production d'énergie électrique aux dépens de la chaleur fournie par les combustibles, qu'ils soient classiques ou nucléaires.

La turbine à vapeur est principalement, utilisée dans les centrales thermiques de production de l'électricité. Les enjeux mondiaux de l'énergie d'une part, et la satisfaction d'une demande de plus en plus aigüe de l'autre part imposent une exploitation rationnelle de ces machines. Par

## Introduction générale

---

conséquent, l'étudiant du génie mécanique, option énergétique, doit avoir une connaissance parfaite de mode de fonctionnement de ces machines. L'étude des cycles thermodynamiques constitue la pierre angulaire de cette connaissance.

Dans ce travail, nous allons faire une étude thermodynamique des performances d'une installation de turbine à vapeur par le logiciel EES. Le mémoire est composé d'une introduction générale et de trois chapitres suivants:

❖ **Le premier chapitre:**

- Historique de la turbine à vapeur
- Définition et description de la turbine à vapeur, son rôle, ses avantages et du principe de fonctionnement.

❖ **Le deuxième chapitre:**

- Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

❖ **Le troisième chapitre:**

- Résultats et discussions suivi par une conclusion générale.

***Chapitre I***  
***Généralités sur les turbines à vapeur***

# Chapitre I

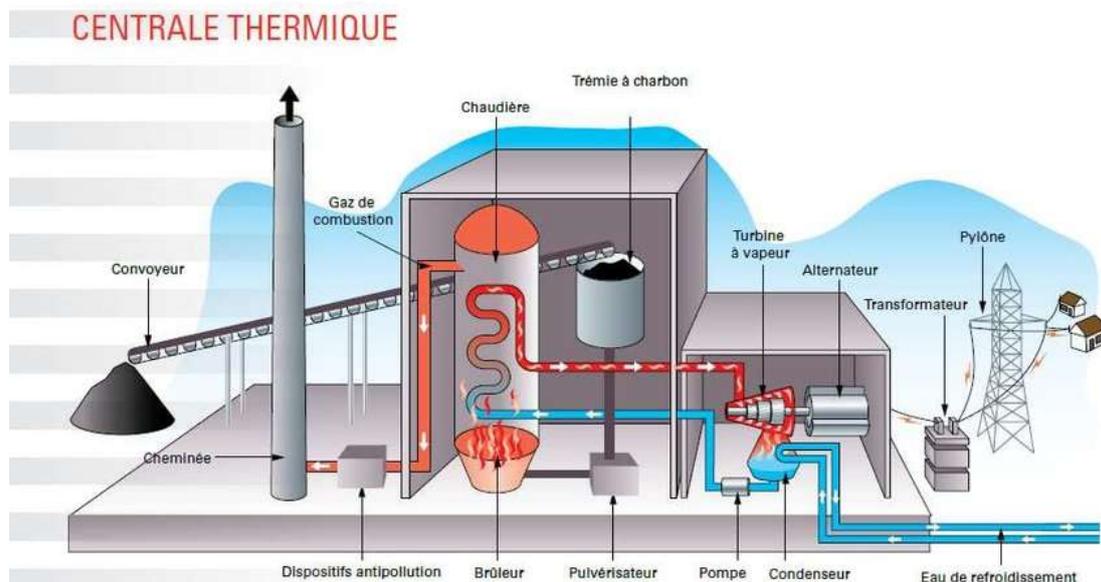
## Généralités sur les turbines à vapeur

### I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser sur l'historique de la turbine à vapeur, sa définition en manière générale, son principe de fonctionnement et les principaux composants de la turbine à vapeur avec ses avantages et ses inconvénients.

### I.2 Définition de la turbine à vapeur

Une turbine à vapeur est un moteur thermique rotatif à combustion externe, qui convertit l'énergie thermique contenue dans la vapeur en énergie mécanique puis en énergie électrique, elle est particulièrement adaptée pour être utilisée pour entraîner un générateur électrique, (voir figure I.1). Ce type de turbine fonctionnant conformément au cycle thermodynamique reconnu comme Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide de travail qui est généralement de la vapeur d'eau.



Figure(I.1) : Centrale thermiques de production d'électricité par turbine à vapeur

(<https://www.researchgate.net>)

### ❖ Principe de fonctionnement

L'eau entre dans la pompe sous forme de liquide saturé et est comprimée de manière isentropique à la pression de fonctionnement de la chaudière. La température de l'eau augmente quelque peu pendant ce processus de compression isentropique en raison d'une légère diminution du volume spécifique d'eau.

L'eau entre dans la chaudière sous forme de liquide comprimé et sort sous forme de vapeur surchauffée. La chaudière est essentiellement un grand échangeur de chaleur où la chaleur provenant des gaz de combustion, des réacteurs nucléaires ou d'autres sources est transférée à l'eau essentiellement à pression constante. La chaudière, avec la section où la vapeur est surchauffée (le surchauffeur), est souvent appelée le générateur de vapeur.

La vapeur surchauffée entre dans la turbine, où elle se dilate de manière isentropique et produit du travail en faisant tourner l'arbre relié à un générateur électrique. La pression et la température de la vapeur chutent pendant ce processus aux valeurs, où la vapeur entre dans le condenseur. Dans cet état, la vapeur est généralement un mélange liquide-vapeur saturé de haute qualité. La vapeur est condensée à pression constante dans le condenseur, qui est essentiellement un grand échangeur de chaleur, en rejetant la chaleur vers un milieu de refroidissement tel qu'un lac, une rivière ou l'atmosphère. La vapeur quitte le condenseur sous forme de liquide saturé et entre dans la pompe, terminant le cycle. Dans les régions où l'eau est précieuse, les centrales électriques sont refroidies par air au lieu d'eau. Cette méthode de refroidissement, également utilisée dans les moteurs de voitures, est appelée refroidissement à sec. Plusieurs centrales électriques dans le monde, dont certaines aux États-Unis, utilisent le refroidissement à sec pour économiser l'eau.

### I.3 Historique sur les turbines à vapeur

Après l'extrapolation faite par Giovanni Branca en 1629, de ce qu'aurait été l'invention d'Héron, les premiers appareils industriels à vapeur ou « pompe à feu » sont apparus au XVIIème siècle pour extraire l'eau des galeries des mines grâce aux travaux de Denis Papin, Thomas Savery et Thomas Newcomen. Cependant, la véritable machine à vapeur industrielle, dans le sens large (chemins de fer, navigation, etc.) fut une réalisation de James Watt. A partir du début du XIXème siècle, des recherches s'opèrent pour améliorer le fonctionnement et le rendement des machines à vapeur et l'idée de machines rotatives commencèrent à germer dans l'esprit de plusieurs inventeurs.

En raison de l'énergie cinétique de l'écoulement de vapeur, la turbine promettait des rendements supérieurs à ceux de la machine à piston de Watt. Elle aussi se profilait à un cout

## Chapitre I: Généralités sur les turbines à vapeur

---

inférieur à cause d'une plus petite taille. Finalement, elle permettait la génération d'un mouvement rotatif sans avoir recours à une bielle.

Des contributions importantes furent apportées par Sir Charles A. Parsons (1854-1931) d'Angleterre, Gustaf Patrick de Laval de Suède (1845-1913), Auguste Rateau (1863-1930) de France et par Charles Gordon Curtis (1860-1953) des Etats- Unis.

Parsons introduisit la turbine à plusieurs étages et il proposa la vente d'une première turbine industrielle vers 1884. Son design consistait en une machine axiale à réaction multi étages. A peu près à la même époque De Laval développa la turbine à vapeur à impulsion. De Laval, qui était descendant d'une famille française installée en Suède dans le XVIIème siècle est aussi connu par l'invention du séparateur à crème.

Des raffinements ont été proposés par la suite, dont ceux de Rateau, avec une turbine multicellulaire ayant un rapport de pression uniforme pour tous les étages. En 1896 Curtis breveta son modèle de turbine à vapeur et vendit les droits à GE en 1901. La première turbine à vapeur américaine en 1899 est également l'une de ses inventions.

### I.4 principaux composants des turbines à vapeur

- **Chaudière**

Le rôle du générateur de vapeur est d'extraire l'énergie calorifique du combustible pour la céder à l'eau et produire de la vapeur à des paramètres fixés. Il constitue la source haute du cycle thermodynamique. Cette vapeur sera utilisée par la turbine pour fournir de l'énergie mécanique.

- **Turbine à vapeur**

Une turbine à vapeur est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide comme l'eau ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), pour faire tourner un arbre solidaire des pales de la turbine.

L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, une pompe ou tout autre récepteur mécanique rotatif.

- **Condenseur**

Afin de maximiser le rendement de la turbine à vapeur, la pression et la température de la sortie de vapeur doivent être aussi basses que possible. Pour cela, la vapeur qui sort de la turbine est dirigée vers le condenseur où elle est refroidie et condensée. Le condenseur est un échangeur de chaleur avec des milliers de tubes dans lesquels l'eau du circuit de

## Chapitre I: Généralités sur les turbines à vapeur

---

refroidissement circule. La vapeur circule sur les tubes et se condense au contact de ceux-ci. L'eau du circuit de refroidissement extrait alors la chaleur de la vapeur.

- **Pompe alimentaire**

Aspire l'eau de la bêche alimentaire et la refoule à travers les réchauffeurs haute pression vers la chaudière, elle alimente le générateur de vapeur en quantité nécessaire d'eau pour maintenir le niveau normal du ballon de la chaudière.

- **Alternateur**

L'alternateur est une machine électrique du type génératrice à courant alternatif qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est entraîné par la turbine.

### I.5 Types de turbines à vapeur

Les turbines à vapeur peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leur construction, des pressions de service, de la taille et de nombreux autres paramètres. Mais il existe deux types de base de turbines à vapeur:

- Turbines à impulsion.
- Turbines à réaction.

La principale distinction est la manière dont la vapeur est détendue lorsqu'elle passe à travers la turbine.

- **Turbine à impulsion**

La turbine à impulsion est composée de pales mobiles alternant avec des buses fixes. Dans la turbine à impulsion, la vapeur est détendue dans des buses fixes et reste à pression constante lors du passage sur les pales. Les turbines Curtis, Rateau ou Brown-Curtis sont des turbines à impulsion. La turbine à vapeur d'origine, la De Laval, était une turbine à impulsion dotée d'une roue à aube. La totalité de la chute de pression de vapeur a lieu uniquement dans les buses fixes. Bien que les pales d'impulsion théoriques aient une chute de pression nulle dans les pales mobiles, pratiquement, pour que l'écoulement ait lieu à travers les pales mobiles, il doit également y avoir une petite chute de pression à travers les pales mobiles.



**Figure(I.2) :** Turbine à impulsion. (<https://www.nuclear-power.net>)

### ➤ Turbine à réaction

La turbine de réaction est composée de pales mobiles (buses) alternant avec des buses fixes. Dans la turbine de réaction, la vapeur est détendue dans des buses fixes et également dans les buses mobiles. En d'autres termes, la vapeur se dilate continuellement lorsqu'elle s'écoule sur les pales. Il y a une perte de pression et de vitesse dans les lames mobiles. Les pales mobiles ont une buse à vapeur convergente. Ainsi, lorsque la vapeur passe sur les pales fixes, elle se dilate avec une diminution de la pression de vapeur et une augmentation de l'énergie cinétique.



**Figure (I.3) :** Turbine à réaction (<https://www.bhge.com>)

### I.6 Avantages d'une turbine à vapeur

- Le principal avantage des turbines à vapeur est d'être un moteur à combustion externe. De ce fait, tous les combustibles (gaz, fioul, charbon, déchets, chaleur résiduelle) et notamment les moins chers peuvent être utilisés pour l'alimenter en vapeur. Le chauffage peut même se faire par énergie solaire. Le rendement peut atteindre des valeurs assez élevées d'où des frais de fonctionnement réduits.
- La turbine à vapeur étant un moteur thermique rotatif, elle est particulièrement adaptée pour être utilisée pour entraîner un générateur électrique.

## Chapitre I: Généralités sur les turbines à vapeur

---

- L'efficacité thermique d'une turbine à vapeur est généralement supérieure à celle d'un moteur alternatif.
- Rapport puissance / poids très élevé par rapport aux moteurs alternatifs.
- Moins de pièces mobiles que les moteurs alternatifs.
- Les turbines à vapeur conviennent aux grandes centrales thermiques. Ils sont fabriqués dans une variété de tailles jusqu'à 1,5 GW (2 000 000 ch) de turbines utilisées pour produire de l'électricité.
- En général, la vapeur contient une grande quantité d'enthalpie (surtout sous forme de chaleur de vaporisation). Cela implique des débits massiques inférieurs à ceux des turbines à gaz.
- En général, la turbine se déplace dans une seule direction, avec beaucoup moins de vibrations qu'un moteur alternatif.
- Les turbines à vapeur ont une plus grande fiabilité, en particulier dans les applications où une puissance élevée et soutenue est requise.

### I.7 Inconvénients

Bien qu'environ 90% de toute la production d'électricité dans le monde se fasse à l'aide de turbines à vapeur, elles présentent également certains inconvénients :

- Les turbines à vapeur sont moins efficaces que les moteurs alternatifs en fonctionnement à charge partielle.
- Ils ont un démarrage plus long que les turbines à gaz et sûrement que les moteurs alternatifs.
- Moins sensible aux changements de la demande de puissance par rapport aux turbines à gaz et aux moteurs alternatifs
- Une turbine à vapeur a un comportement de changement de charge lente, ce qui signifie une fois démarré la turbine ne peut pas être arrêté rapidement.
- Turbine à vapeur à basse pression produit un effet secondaire qui est difficile à manipuler. La pression de la vapeur dans ce cas tombe sous 1 bar. En différents endroits des pales de la dernière étape, la vapeur atteint la vitesse du son.
- La puissance des turbines à vapeur varie de 1 cheval-vapeur jusqu'à 1,5 GW (environ 2000000 Hp). Les plus petits ne sont pas très fréquents, en raison de l'inconvénient du rapport prix-performance. Ceci se applique également pour les turbines à vapeur jusqu'à plusieurs MW (1 MW = 1,000 kW).

***Chapitre II***

***Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES***

## Chapitre II

# Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le cycle de Rankine et le cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) avec une description du logiciel EES (Engineering Equation Solver).

### II.2 Cycles thermodynamiques étudiés de la turbine à vapeur

#### II.2.1 Cycle de Rankine de base

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique idéalisé d'un moteur thermique à pression constante qui convertit une partie de la chaleur en travail mécanique. Dans ce cycle, la chaleur est fournie de l'extérieur à une boucle fermée, qui utilise généralement de l'eau (en phase liquide et vapeur) comme fluide de travail. Contrairement au cycle de Brayton, le fluide de travail du cycle de Rankine subit le changement de phase d'une phase liquide à une phase vapeur et vice versa, (voir figure II.1).

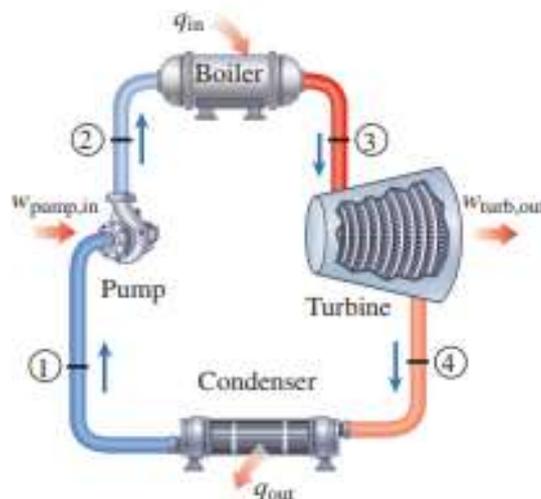
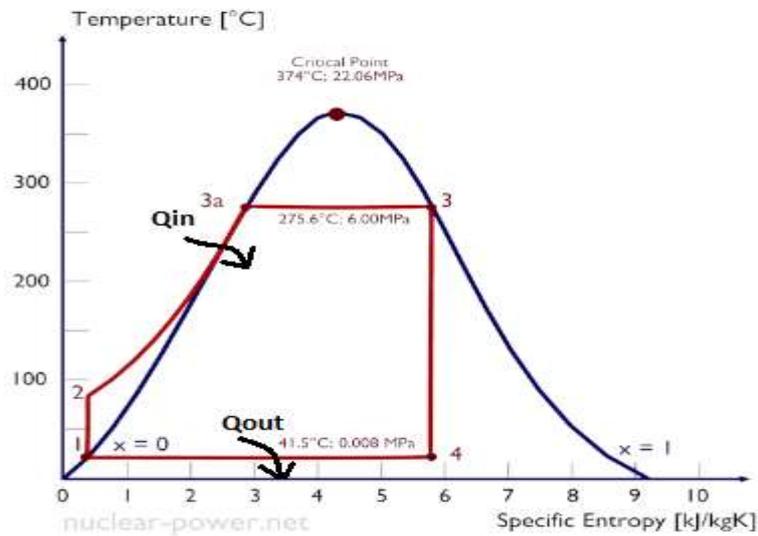


Figure (II.1): Schéma simplifié d'une turbine à vapeur

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

Le diagramme T-S du cycle de Rankine est représenté dans la **figure II.2**.



**Figures (II.2) :** Diagramme T-S du cycle de Rankine  
(nuclear-power.net)

- 1 – 2 : Compression isentropique (compression dans les pompes centrifuges)
- 2 – 3a – 3 : Apport de chaleur isobare (dans la chaudière)
- 3 - 4 : Détente isentropique (dans la turbine à vapeur)
- 4 – 1 : Rejet de chaleur isobare (condensation dans le condenseur).

Pompe ( $q=0$ ):

$$W_{\text{Pompe}} = h_2 - h_1 \quad (\text{II.1})$$

Chaudière ( $W=0$ ):

$$Q_{\text{in}} = h_3 - h_2 \quad (\text{II.2})$$

Turbine ( $Q=0$ ):

$$W_{\text{Turbine}} = h_3 - h_4 \quad (\text{II.3})$$

Condenseur ( $W=0$ ):

$$Q_{\text{out}} = h_4 - h_1 \quad (\text{II.4})$$

Le rendement thermique :

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \quad (\text{II.5})$$

Et :

$$W_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \quad (\text{II.6})$$

Donc :

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \quad (\text{II.7})$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \quad (\text{II.8})$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (\text{II.9})$$

### II.2.2 Cycle de Rankine à surchauffe (Cycle de Hirn)

Le processus de surchauffe est le seul moyen d'augmenter la température maximale du cycle de Rankine (et d'augmenter l'efficacité) sans augmenter la pression de la chaudière. Cela nécessite l'ajout d'un autre type d'échangeur de chaleur appelé surchauffeur, qui produit de la vapeur surchauffée, (**voir figure II.3**).

Le cycle de Rankine à surchauffe ou cycle de Hirn (figure II.4) ne diffère du cycle de Rankine simple que par une transformation supplémentaire, pendant laquelle le fluide moteur est surchauffé à une température supérieure à celle de saturation, en lui fournissant une troisième quantité de chaleur dans le surchauffeur. Ceci a pour effet d'augmenter énormément le travail de détente et donc le travail utile est d'améliorer les conditions de travail de la turbine et donc son rendement interne puisque une grande partie des étages de la turbine fonctionnent avec de la vapeur sèche. En même temps le rendement thermique du cycle augmente.

Dans un cycle de Rankine idéal à surchauffe, le système exécutant le cycle subit une série de quatre processus: deux processus isentropiques (adiabatiques réversibles) alternés avec deux processus isobares, (**voir figure II.4**).

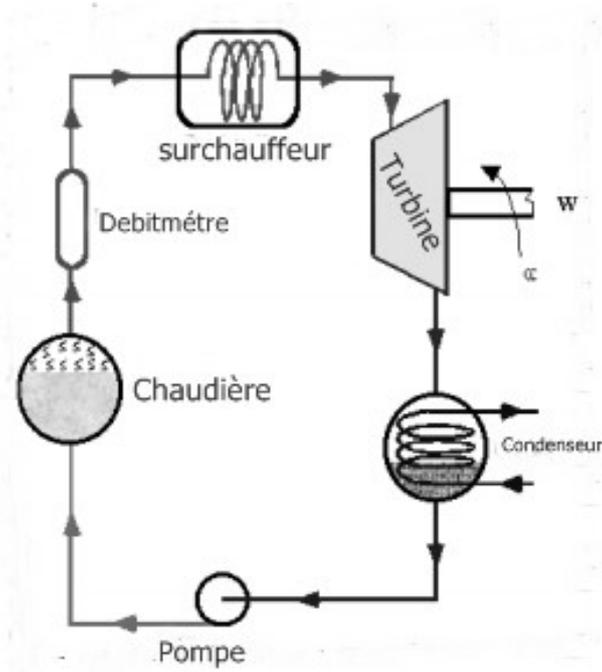
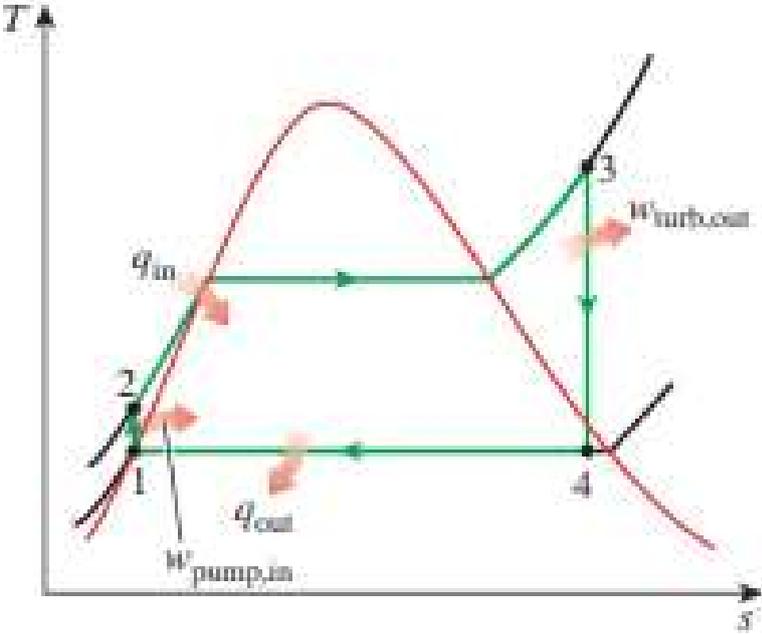


Figure (II.3): Schéma simplifié d'une turbine à vapeur avec surchauffe (cel.archives-ouvertes.fr)



Figures (II.4): Diagramme T-S du cycle de Rankine à surchauffe (Hirn idéal).

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

---

Le cycle qui en résulte est le cycle de Rankine, qui est le cycle idéal pour les centrales à vapeur. Le cycle de Rankine idéal n'implique aucune irréversibilité interne et comprend les quatre processus (transformations) suivants de systèmes ouverts en régime permanent :

- 1-2 Compression isentropique dans une pompe
- 2-3 Ajout de chaleur à pression constante (isobare) dans une chaudière
- 3-4 Expansion isentropique dans une turbine
- 4-1 Rejet de chaleur à pression constante (isobare) dans un condenseur

### ❖ Analyse énergétique du cycle de Rankine avec surchauffe (Hirn) idéal

Les quatre composants associés au cycle de Rankine (la pompe, la chaudière, la turbine et le condenseur) sont des dispositifs à débit constant, et donc les quatre processus qui composent le cycle de Rankine peuvent être analysés comme des processus à débit constant. Les changements d'énergie cinétique et potentielle de la vapeur sont généralement faibles par rapport aux conditions de travail et de transfert de chaleur et sont donc généralement négligés. Ensuite, l'équation d'énergie à débit constant par unité de masse de vapeur se réduit à

$$(Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = h_f - h_i \quad (II.10)$$

La chaudière et le condenseur n'impliquent aucun travail et la pompe et la turbine sont supposées isentropiques. Ensuite, la relation de conservation de l'énergie pour chaque appareil peut être exprimée comme suit:

Pompe (Q=0):

$$W_{pompe,in} = h_2 - h_1 \quad (II.11)$$

Où,

$$W_{pompe,in} = V \cdot (P_2 - P_1) \quad (II.12)$$

Chaudière (W=0):

$$Q_{in} = h_3 - h_2 \quad (II.13)$$

Turbine (Q=0):

$$W_{turbine,out} = h_3 - h_4 \quad (II.14)$$

Condenseur (W=0):

$$Q_{out} = h_4 - h_1 \quad (II.15)$$

L'efficacité thermique du cycle de Rankine est déterminée à partir de :

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (II.16)$$

Avec:

$$W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = W_{turb,out} - W_{pompe,in} \quad (II.17)$$

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

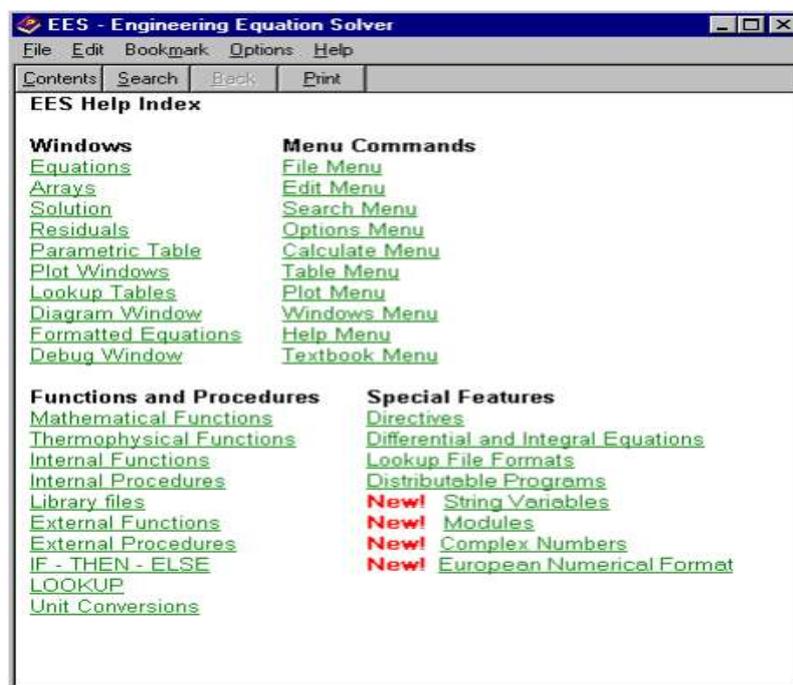
### II.3 Description du logiciel EES

#### II.3.1 Définition de logiciel EES

EES est l'abréviation de Engineering Equation Solver ou Solveur d'équations pour l'ingénierie. EES permet de résoudre des systèmes d'équations algébriques, des équations différentielles, des équations à variables complexes. EES permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires, de générer des courbes de grande qualité.

#### II.3.2 Information générale

Quand vous exécutez EES, une boîte de dialogue apparaît. Celle-ci contient le numéro d'enregistrement, le numéro de version. Ces informations vous seront demandées dans le cas où vous feriez appel au support technique. Cliquer sur le bouton 'OK' pour commencer une session EES. Une aide en ligne est disponible en permanence. Pour activer l'aide, appuyer sur la touche 'F1'. Pour visualiser l'index de l'aide, cliquer sur le bouton 'Contents'. Ce fichier d'aide comporte de nombreux liens hypertexte (mots soulignés en vert).



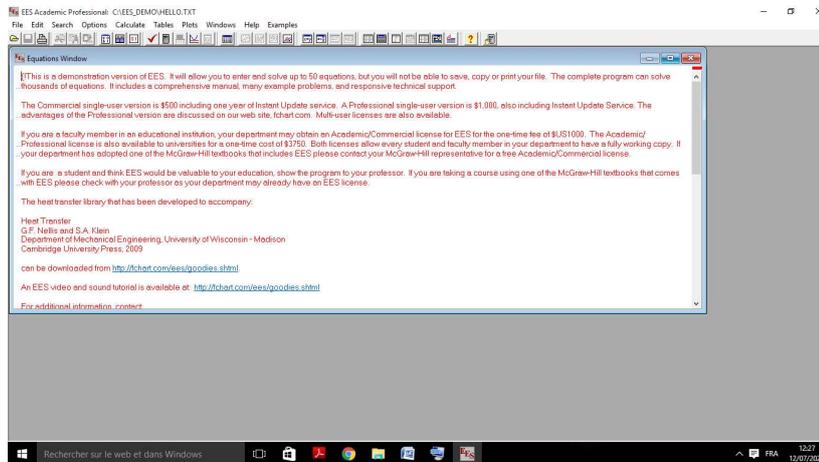
**Figure (II.5):** Fenêtre des Informations général. (Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

#### II.3.3 Exploration du menu principal

Les commandes du logiciel EES sont réparties selon 9 menus déroulants accessibles à partir du menu principal. Une barre d'outils, contenant plusieurs icônes permet à l'utilisateur

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

d'accéder plus rapidement aux commandes les plus utilisées du menu principal. Au démarrage du logiciel, cette barre d'outils est située en dessous de la barre de menu.



**Figure (II.6):** Interface du logiciel EES.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

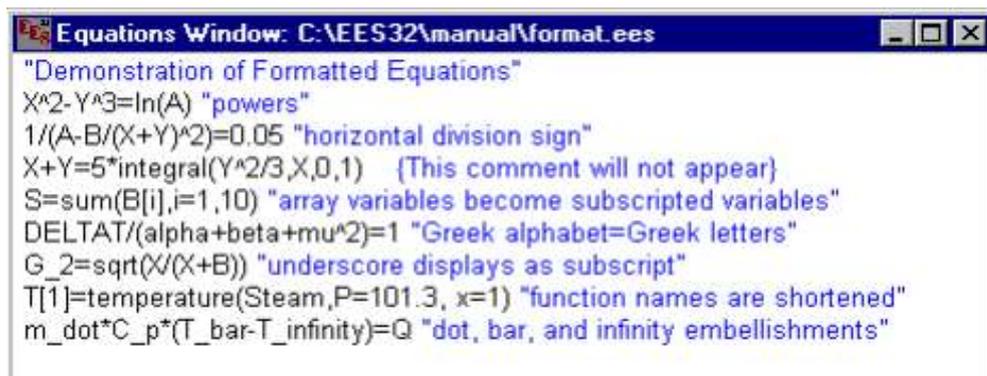
### II.3.4 Fenêtres de EES

#### a. Fenêtre d'équations

La saisie des équations se fait dans une fenêtre dédiée d'une façon similaire à la saisie d'un document dans un traitement de texte classique. Les commandes d'édition, Copier, Couper, Coller sont disponibles dans le menu 'Edit'.

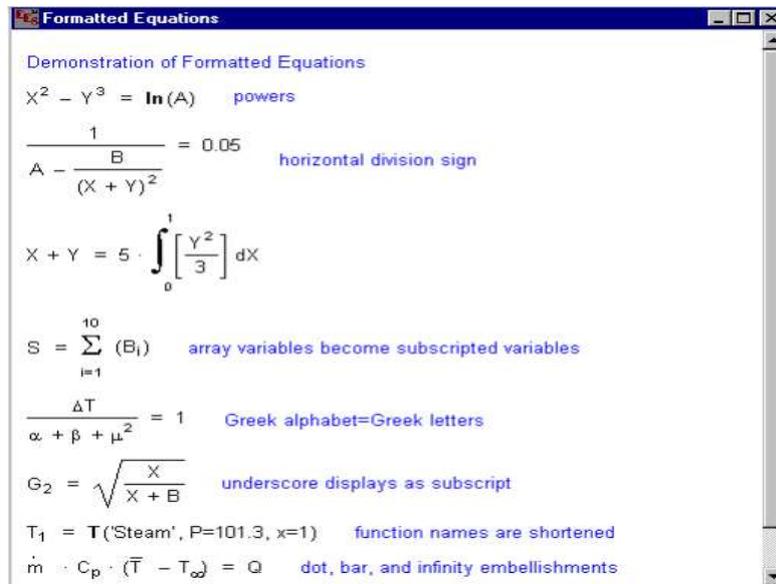
#### b. Fenêtre de mise en forme d'équations

Cette fenêtre affiche les équations saisies sous la forme mathématique usuelle



**Figure (II.7):** Interface de la fenêtre de mise en forme d'équations.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)



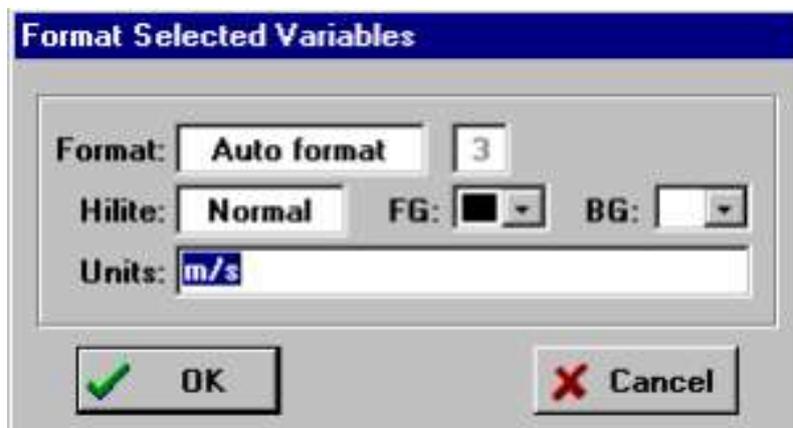
**Figure(II.8):** Interface d'un exemple d'équation sur La fenêtre de mise en forme d'équations.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

Noter que seuls les commentaires placés entre guillemets sont affichés dans cette fenêtre. EES dispose d'un grand nombre de caractéristiques permettant d'améliorer la présentation de vos problèmes.

### c. Fenêtre de Solution

La fenêtre de Solution s'affichera automatiquement en avant plan une fois les calculs effectués. Les valeurs et les unités de chacune des variables de la fenêtre d'Equations apparaîtront dans l'ordre alphabétique. Par ailleurs, il est possible de réajuster la taille des colonnes dans cette fenêtre. Le format des variables et leurs unités peuvent être modifiés à l'aide de la commande "Information" sur les variables du menu 'Option'.



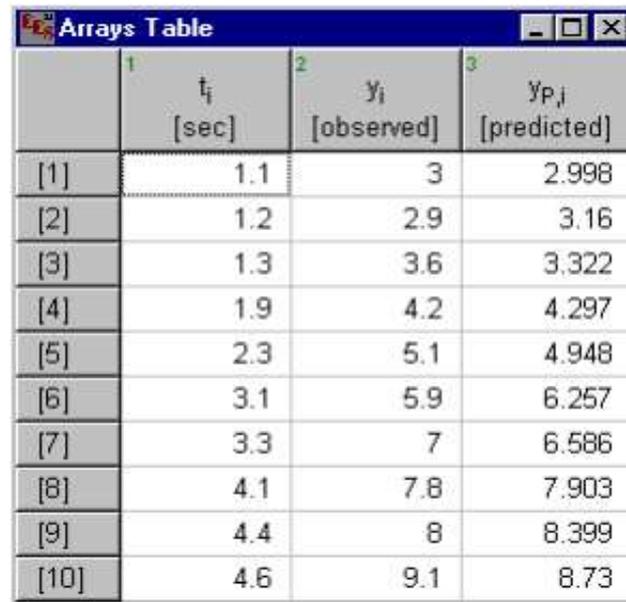
**Figure (II.9):** Façade de la fenêtre de solution.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

### d. Fenêtre Tableaux

Les valeurs de toutes variables y compris les variables de type tableaux sont normalement affichées dans la fenêtre de Solution après les calculs, il est possible de présenter ces variables dans une fenêtre Tableaux plutôt que dans la fenêtre Solution (cette option est paramétrable dans la boîte de dialogue Préférence) comme présenté ci-dessous :



	1	2	3
	$t_i$ [sec]	$y_i$ [observed]	$y_{p,i}$ [predicted]
[1]	1.1	3	2.998
[2]	1.2	2.9	3.16
[3]	1.3	3.6	3.322
[4]	1.9	4.2	4.297
[5]	2.3	5.1	4.948
[6]	3.1	5.9	6.257
[7]	3.3	7	6.586
[8]	4.1	7.8	7.903
[9]	4.4	8	8.399
[10]	4.6	9.1	8.73

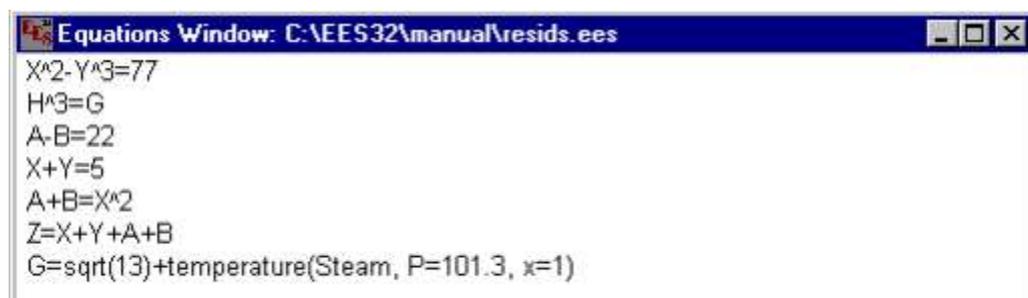
Figure (II.10): Interface de La fenêtre Tableaux.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

### e. Fenêtre Résiduelle (Résiduel Windows)

La fenêtre Résiduelle indique le bloc d'équation, l'ordre de calcul utilisé par EES, ainsi que les valeurs relatives et absolues résiduelles. La valeur absolue résiduelle d'une équation est la différence entre les valeurs situées à gauche et à droite d'une équation.

La valeur résiduelle relative est déterminée en faisant la division entre la valeur résiduelle absolue par la valeur de l'expression située à gauche d'une équation.



```
X^2-Y^3=77
H^3=G
A-B=22
X+Y=5
A+B=X^2
Z=X+Y+A+B
G=sqrt(13)+temperature(Steam, P=101.3, x=1)
```

Figure (II.11): Fenêtre Résiduelle.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

f. Fenêtre de la table paramétrique

	1 P2 [kPa]	2 T2 [C]	3 Vel2 [m/s]	4 h2 [kJ/kg]
Run 1	100	31.46	109.9	278.9
Run 2	150	36.32	73.79	282.2
Run 3	200	38.7	55.29	283.4
Run 4	250	40.34	44.08	284
Run 5	300	41.67	36.57	284.3

Figure (II.12): Fenêtre de la table paramétrique.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

g. Fenêtre 'Lookup Table'

De nombreuses fonctions sont afférentes à la table 'Lookup'. La fonction Interpolate permet d'effectuer des interpolations ou des extrapolations linéaires, quadratiques ou cubiques. Les fonctions Lookup, LookupCol, et LookupRow permettent aux données d'être interpolées linéairement et utilisables dans des équations. La table 'Look up' peut être contenue dans la fenêtre 'Lookup Table Windows' ou dans un fichier de type .LKT

	1 Temp [C]	2 Time [sec]	3 Pos [m]
Row 1	100.0	0.00	5.50
Row 2	120.0	1.00	5.86
Row 3	140.0	2.00	6.11
Row 4	160.0	3.00	6.36
Row 5	180.0	4.00	6.58

Figure (II.13): Fenêtre 'Lookup Table'.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

### II.3.5 Menus principaux de logiciel EES

#### 1. Menu Options

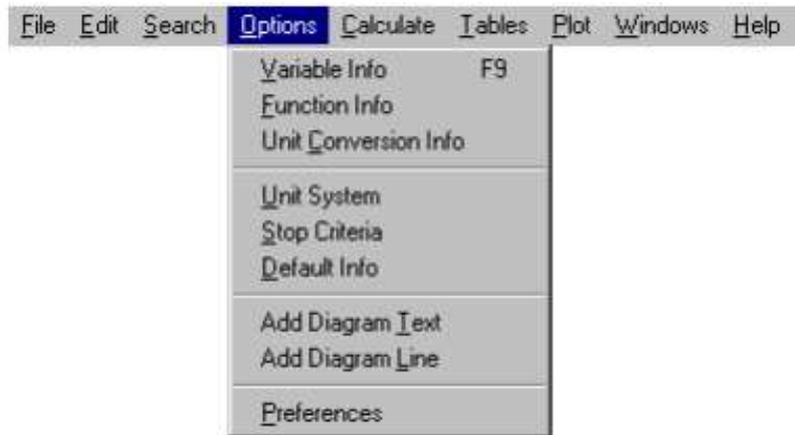


Figure (II.14): Menu Options.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

- **Variable Info** affiche une boîte de dialogue dans laquelle on peut trouver le nom des variables de la fenêtre d'Equations, suivi de leur valeur par défaut, des valeurs limites (basses et hautes), du format d'affichage ainsi que leurs unités.
- **Function Info** permet d'ouvrir la boîte de dialogue suivante :

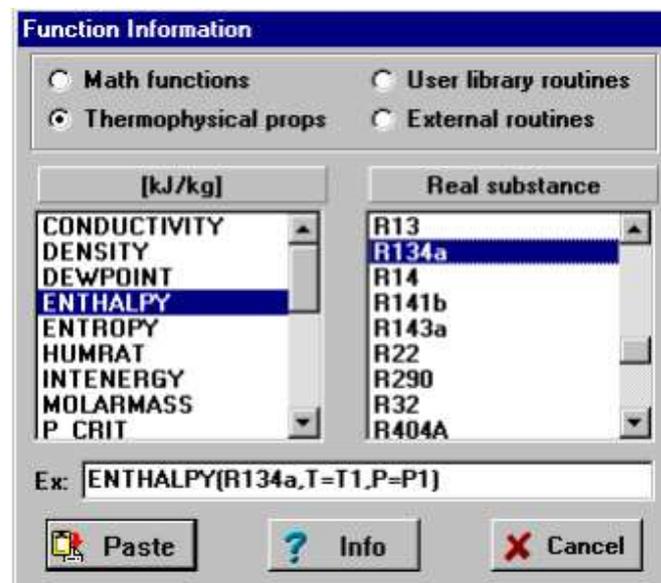
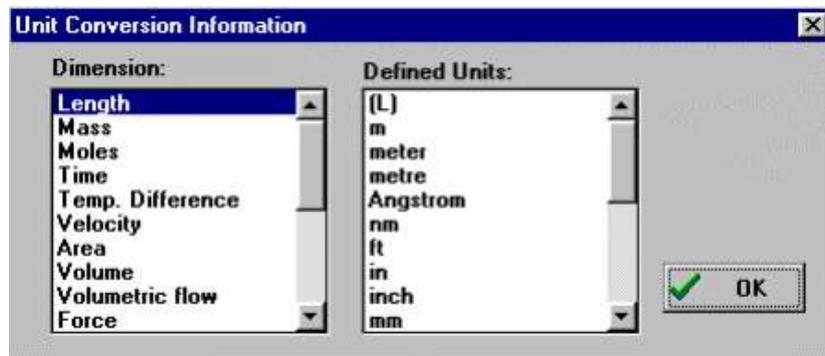


Figure (II.15): Boîte de dialogue.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

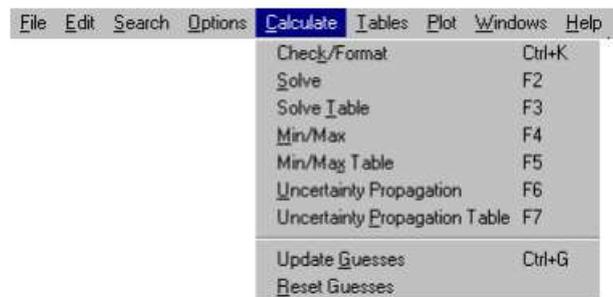
- **Unit Conversion Info** permet d'afficher les unités afférentes à un ensemble de dimension :



**Figure (II.16):** Fenêtre 'Unit Conversion Info'.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

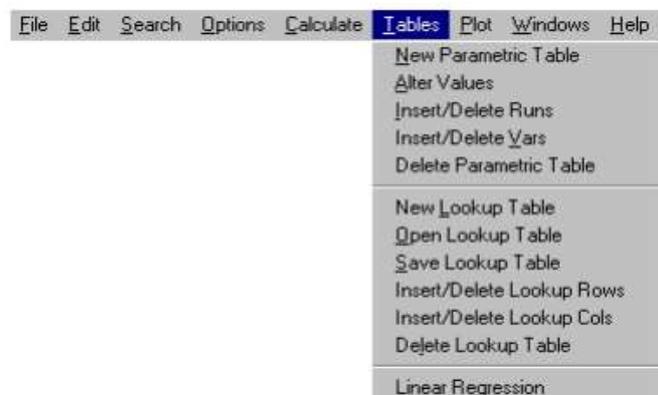
### 2. Menu de calculs (Calculate)



**Figure (II.17):** Menu de calculs.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

### 3. Menu Tables



**Figure (II.18):** Menu Tables.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

- **New Parametric** : Table permet de générer une nouvelle table paramétrique (cette action efface la table paramétrique existante). La table paramétrique permet de faire des calculs répétés pour résoudre par exemple des équations différentielles. Les résultats peuvent être représentés graphiquement par le biais du menu PLOT.
- **Alter Values** : Permet d'entrer ou d'effacer automatiquement les valeurs d'un variable sur plusieurs itérations. Il existe deux façons pour changer la valeur d'une donnée de la table paramétrique. Premièrement, les changements peuvent s'effectuer directement dans la cellule. Deuxièmement, un clic sur le bouton situé dans le coin supérieur droit de chaque colonne invoque la boîte de dialogue ci-dessous, vous permettant de modifier la valeur des données de la colonne:

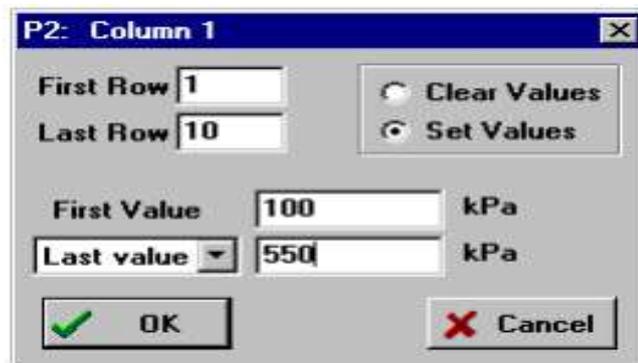


Figure (II.19): Interface de 'Alter Values'.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

### 4. Menu Plot

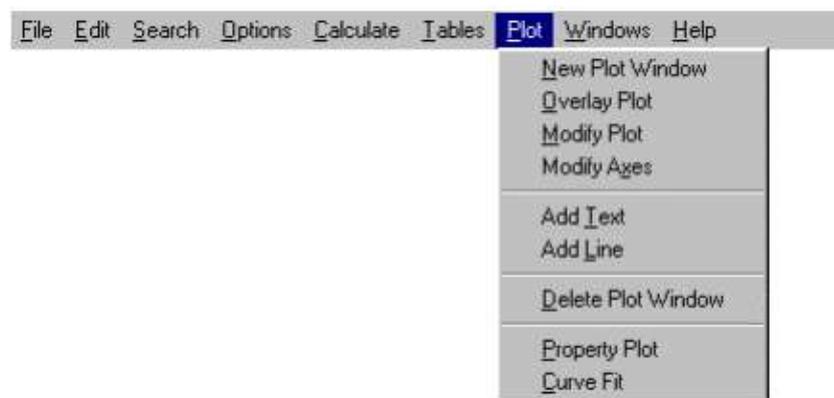


Figure (II.20): Menu Plot.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

## Chapitre II: Etude thermodynamique du cycle de Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) et présentation du logiciel EES

- **New Plot Window** : Permet de tracer toute variable issue d'une table paramétrique, 'Lookup' ou d'un tableau en fonction d'autres variables de cette table.
- **Overlay Plot** permet de superposer des courbes sur un même graphique.
- **Modify Plot** permet de modifier les caractéristiques du tracé existant.
- **Modify Axes** permet de modifier l'apparence des axes des abscisses et des ordonnées du tracé existant.
- **Add Text** permet d'ajouter une zone de texte dans le graphique courant à l'aide de la boîte de dialogue ci-dessous. Le texte à afficher s'écrit dans le champ 'text' :

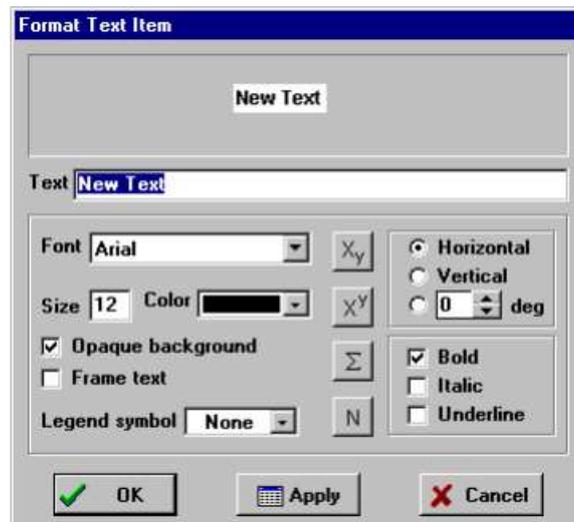
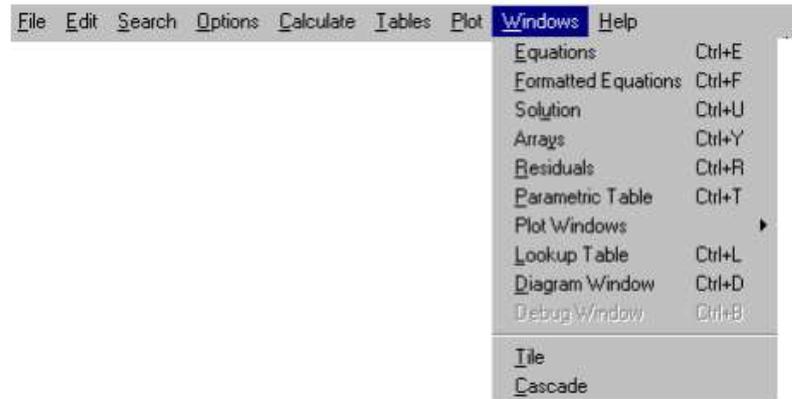


Figure (II.21): Interface de ' add text '.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

- **Add Line** permet de placer une ligne ou une flèche à l'intérieur du graphique.
- **Delete Plot Window** permet d'effacer le contenu de la fenêtre de Tracés.
- **Property Plot** permet de visualiser la représentation graphique d'une propriété thermodynamique pour une substance donnée. Les axes et le format de tracé peuvent être modifiés avec les commandes **Modify Axes** et **Modify Plot**.

## 5. Menu Windows



**Figure (II.22):** Menu Windows. (Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows ‘F-Chart Software’ PDF)

- **Equations** affiche la fenêtre d’Equations.
- **Formatted Equations** vérifie la syntaxe des équations saisies et affiche la fenêtre de mise en forme usuelle des équations. (format mathématique).
- **Solution, Arrays** and **Residuals** affichent respectivement les fenêtres de Solutions, de Tableaux et la fenêtre Résiduelle.
- **Plot Windows** affiche un sous menu pour chacun des 10 tracés possibles.
- **Parametric Table** et **Lookup Table** affiche les fenêtres relatives à la table paramétrique et à la table ‘Lookup’ au premier plan.
- **Diagram** affiche la fenêtre de Diagramme. Un diagramme, ou un schéma de principe est saisi dans un utilitaire de dessin quelconque.
- **DebugWindow** affiche la fenêtre de ‘Débogage’. Cette commande est accessible uniquement si le système d’équations soumis à EES comporte plus d’inconnues que d’équations.
- **Tile** arrange les fenêtres actives de telle manière qu’il possible de visualiser une portion de celles-ci.
- **Cascade** arrange les fenêtres actives de telle manière qu’il possible de visualiser la barre de titre de chacune d’entre elles.

## 6. Menu Help



**Figure (II.23):** Menu Help.

(Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

- **Help Index** active l'aide. Une fenêtre contenant l'index des informations accessibles s'affiche. Pour voir un sujet, cliquer sur celui-ci. L'aide est accessible également par l'appuie de la touche F1. L'aide affichée sera relative au contexte.
- **Using Help** active une fenêtre décrivant comment utiliser l'aide.
- **About EES** permet d'ouvrir la boîte 'A propos...' de EES. Elle contient entre autre, la version du programme, la quantité de mémoire disponible et le numéro d'enregistrement. Ces informations vous seront demandées dans le cas où vous feriez appel au support de F-Chart Software.

***Chapitre III***  
**Résultats et discussions**

# Chapitre III: Résultats et discussions

### III.1 Introduction

L'objectif de cette étude est l'analyse thermodynamique des performances du cycle de Rankine à surchauffe (cycle de Hirn). Les effets étudiés sont l'effet de la température à l'entrée de la turbine et l'effet de la pression dans le condenseur. Le logiciel du calcul est le logiciel EES (Engineering Equation Solver).

Les résultats de l'étude sont visualisés graphiquement comme suit:

- La variation du de l'énergie thermique entrante  $Q_{in}$
- La variation du de l'énergie thermique perdue  $Q_{out}$
- La variation du travail net en fonction  $W_{net}$
- La variation du travail de la turbine  $W_t$
- La variation du travail de pompe  $W_p$
- La variation du rendement thermique  $\eta_{th}$

### III.2 Résultats et discussions

#### III.2.1 Etude des performances du cycle de Rankine avec surchauffe (cycle de Hirn) avec le logiciel EES

A partir du logiciel EES nous avons réalisé une simulation thermodynamique des performances du cycle de Rankine avec surchauffe (cycle de Hirn).

Les données de la simulation sont présentées comme suit:

(Water),  $T_3=300^\circ\text{C}$ ,  $P_3=2000\text{kPa}$ ,  $P_4=3.5\text{kPa}$

Le programme du cycle de Rankine à surchauffe (cycle de Hirn) avec le logiciel EES est présenté comme suit:

"Etude du cycle de Rankine à surchauffe ( cycle de Hirn)"

"Données"

"Point 1"

$x[1]=0$

$P[1]=P[4]$

$h[1]=\text{Enthalpy}(\text{Water};P=P[1];x=x[1])$

$s[1]=\text{Entropy}(\text{Water};P=P[1];x=x[1])$

$T[1]=\text{Temperature}(\text{Water};P=P[1];x=x[1])$

## Chapitre III : Résultats et discussions

---

### "Point 2"

$$P[2]=P[3]$$

$$W_p=v[1]*(P[2]-P[1])$$

$$h[2]=h[1]+W_p$$

$$s[2]=\text{Entropy}(\text{Water};h=h[2];P=P[2])$$

$$T[2]=\text{Temperature}(\text{Water};h=h[2];P=P[2])$$

$$x[2]=0$$

### "Point 3"

$$P[3]=2000[\text{kPa}]$$

$$T[3]=300[\text{C}]$$

$$h[3]=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[3];P=P[3])$$

$$s[3]=\text{Entropy}(\text{Water};T=T[3];P=P[3])$$

$$x[3]=1$$

### "Point 4"

$$P[4]=3,5[\text{kPa}]$$

$$s[4]=s[3]$$

$$h[4]=\text{Enthalpy}(\text{Water};s=s[4];P=P[4])$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{Water};s=s[4];P=P[4])$$

$$x[4]=\text{Quality}(\text{Water};T=T[4];h=h[4])$$

### "Solution"

#### "c- le travail net"

$$W_t=h[3]-h[4]$$

$$W_{\text{net}}=W_t-W_p$$

#### "d- le rapport de chaleur"

$$Q_{\text{in}}=h[3]-h[2]$$

$$Q_{\text{out}}=h[4]-h[1]$$

"e- le rendement"

$$\text{Eta}_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

### a. Diagramme T-S du cycle de Rankine à surchauffe ( cycle de Hirn)

Le cycle de Hirn se caractérise par une surchauffe en fin d'évaporation. Cette variante est le cycle qui se rapproche le plus du fonctionnement d'un cycle eau-vapeur d'une centrale thermique. En plus de fournir un gain d'efficacité, la surchauffe diminue l'humidité de la vapeur nuisible aux aubes de turbines.

La **figure (III.1)** représente le diagramme T-S de cycle de Hirn depuis logiciel EES.

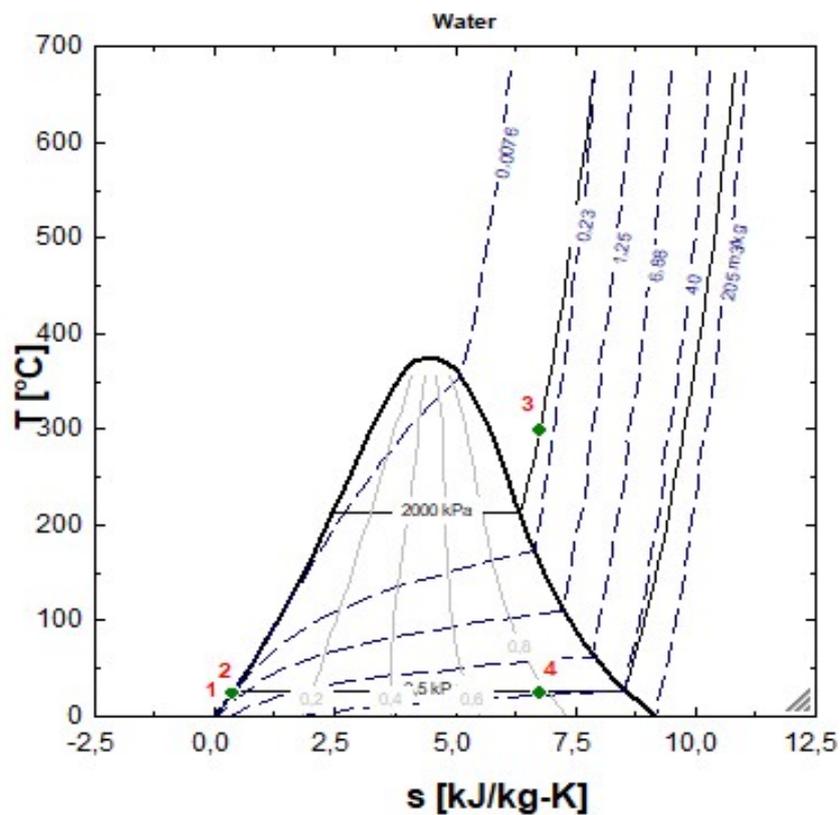


Figure (III.1) : Diagramme T-S de cycle de Hirn.

### b. Points du cycle

Le **tableau (III.1)** présente les points du cycle de Hirn depuis logiciel EES.

Points du cycle	$h_i$ [kJ/kg]	$p_i$ [kPa]	$S_i$ [kJ/kg.K]	$T_i$ [°C]	$X_i$
<u>1</u>	111,8	3,5	0,3904	26,68	0
<u>2</u>	113,8	2000	0,3904	26,72	0
<u>3</u>	3023	2000	6,765	300	1
<u>4</u>	2023	3,5	6,765	26,68	0,7841

**Tableau (III.1) :** Points du cycle de Hirn.

### c) Etude des effets sur les performances du Cycle de Hirn

#### a. Effet de l'effet de la température à l'entrée de la turbine

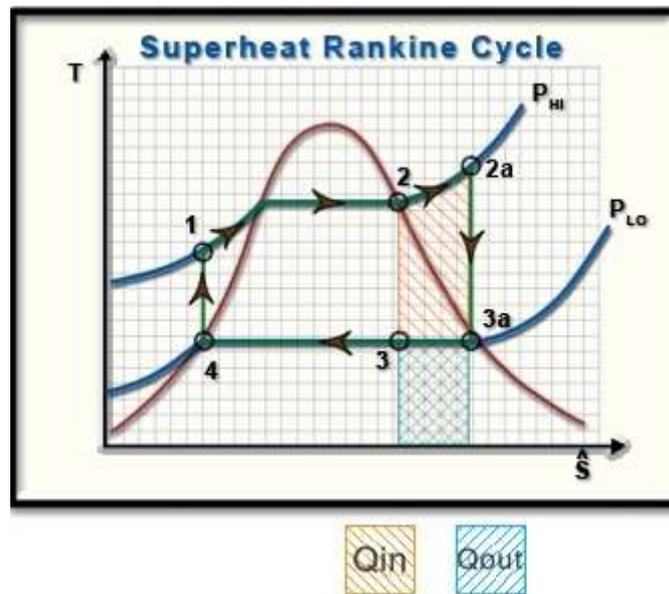
La même turbine à vapeur avec :  $T_3$  (température à l'entrée de la turbine :  $T_3=300, 350, 400$  et  $450$  C°).

- Performances du cycle de Hirn en fonction de «  $T_3$  »

Le **tableau (III.2)** présente les performances du cycle de Hirn en fonction de la température à l'entrée de la turbine «  $T_3$  ».

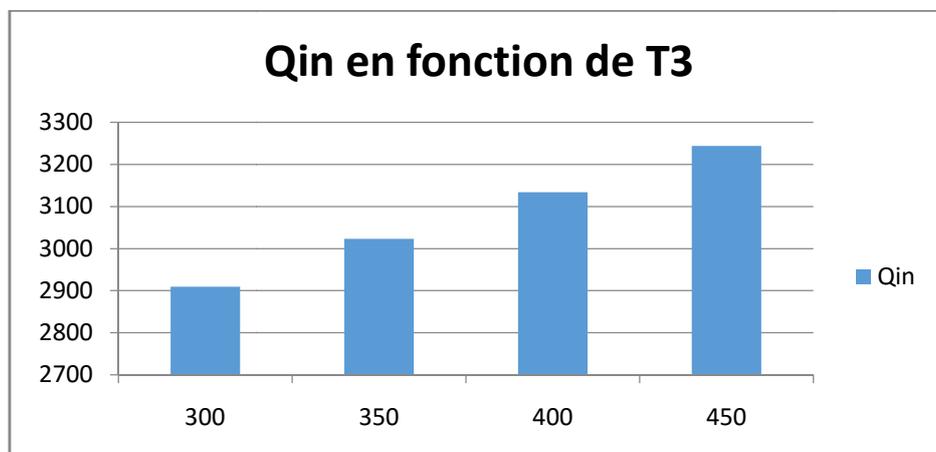
$T_3$ [°C]	$Q_{in}$ [kJ/kg]	$Q_{out}$ [kJ/kg]	$W_{net}$ [kJ/kg]	$W_t$ [kJ/kg]	$W_p$ [kJ/kg]	$\eta_{th}$ %
300	2909	1911	997,7	999,7	2,003	34,3
350	3023	1968	1054	1056	2,003	34,88
400	3134	2020	1114	1116	2,003	35,55
450	3244	2067	1177	1179	2,003	36,28

**Tableau (III.2):** Performances du cycle de Hirn en fonction de la température à l'entrée de la turbine.



**Figure (III.2) :** Diagramme T-S de Rankine à surchauffe avec changement de la température à l'entrée de la turbine.

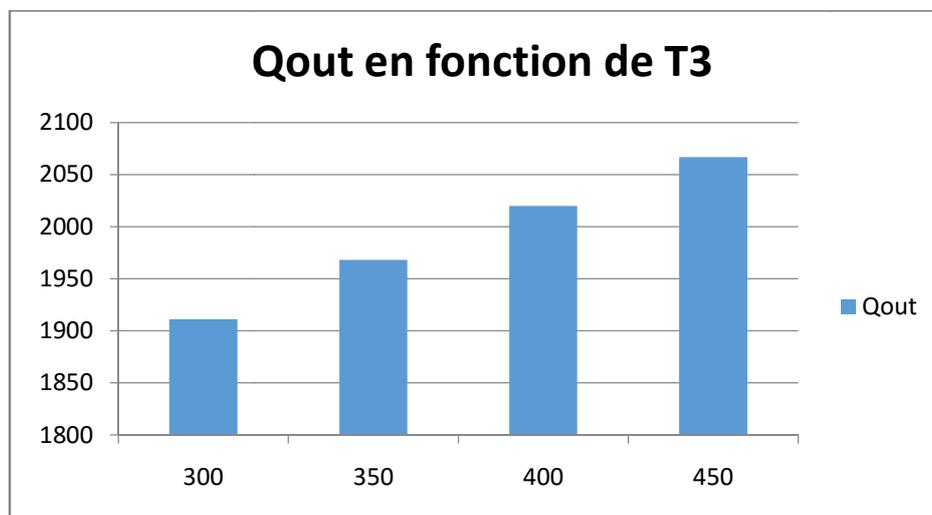
La **figure (III.3)** montre la variation de l'énergie thermique entrante «  $Q_{in}$  » du cycle en fonction de la température à l'entrée de la turbine «  $T_3$  ». On remarque une augmentation d'énergie thermique entrante avec l'augmentation de «  $T_3$  ». L'eau acquiert plus d'énergie thermique à l'intérieur de la chaudière afin d'élever la température à l'entrée de la turbine. Par conséquent, chaque fois que nous voulons augmenter la température  $T_3$ , il faut consommer plus d'énergie thermique entrante  $Q_{in}$ . Cela peut être facilement visualisé à travers le diagramme T-S du cycle de Rankine, voir **figure (III.2)**. La surface sous le chemin de la chaudière est égale à " $Q_{in}$ ". La zone sous le chemin du processus de réchauffement dans la chaudière augmente rapidement à mesure que le point 2 se déplace vers le point 2a car l'isobare monte en pente après avoir quitté l'enveloppe à 2 phases.



**Figure (III.3):** Energie thermique entrante en fonction de la température à l'entrée de la turbine.

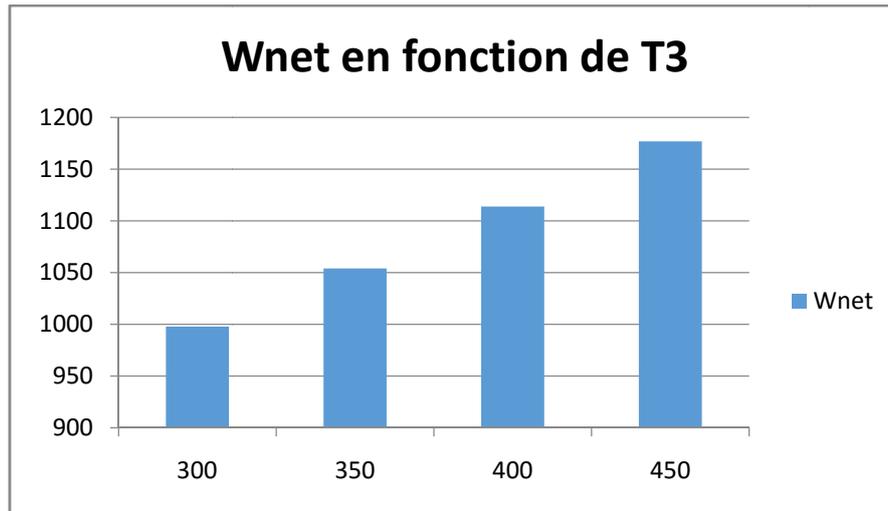
### Chapitre III : Résultats et discussions

La **figure (III.4)** montre la variation de l'énergie thermique perdue «  $Q_{out}$  » du cycle en fonction de la température à l'entrée de la turbine «  $T_3$  ». Étant donné que l'augmentation de la température  $T_3$  est due à une augmentation de l'énergie thermique entrante  $Q_{in}$ , le cycle perd plus d'énergie thermique dans le condenseur  $Q_{out}$ . Donc plus nous gagnons d'énergie, plus nous la perdons. Cela peut être facilement visualisé à travers le diagramme T-S de Rankine Cycle, voir **figure (III.2)**. La zone sous le chemin du condenseur est égale à " $Q_{out}$ ". La zone sous le trajet du condenseur augmente également à mesure que le point 3 glisse vers le point 3a, mais pas à la même vitesse que l'augmentation de " $Q_{in}$ ", car le trajet est une ligne horizontale.



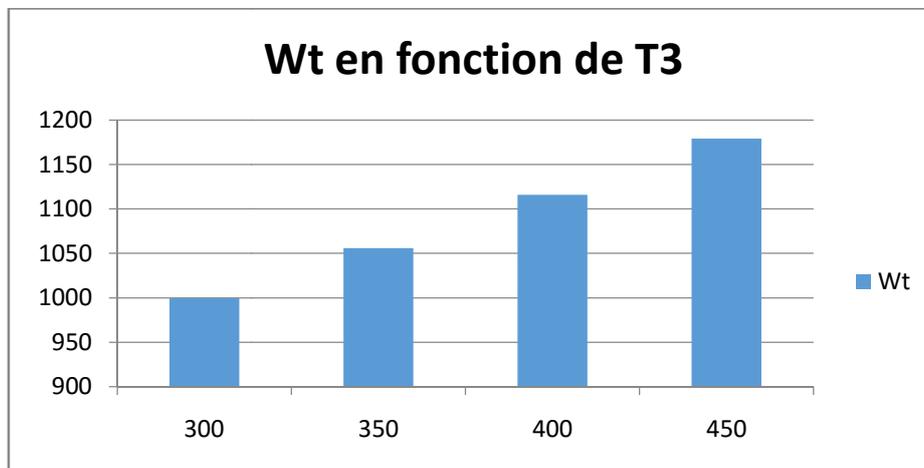
**Figure (III.4):** Energie thermique perdue en fonction de la température à l'entrée de la turbine.

La **figure (III.5)** montre la variation du travail net du cycle en fonction de la température à l'entrée de la turbine. On remarque quand on augmente la température à l'entrée de la turbine, le travail net du cycle augmente. En se référant à :  $W_{net} = q_{in} - q_{out}$  (Eq II.17), Puisque l'augmentation de l'énergie entrante est importante par rapport à l'énergie perdue. Et par l'équation précédent au travail net, l'augmentation est proportionnelle avec l'acquisition de plus d'énergie pour le cycle lui rapportera plus de travail net.



**Figure (III.5):** Travail net en fonction de la température à l'entrée de la turbine.

La **figure (III.6)** montre la variation du travail de la turbine en fonction de la température à l'entrée de la turbine, On remarque une augmentation du travail de la turbine avec l'augmentation de la température à l'entrée de la turbine. Dans la turbine est considérée comme un processus détente isentropique, la vapeur est détendue, produisant du travail. Donc plus on fait entrer de la vapeur à température élevée, plus le travail de la turbine est important, et cela est dû à l'augmentation de la température de  $T_3$ .



**Figure (III.6):** Travail de la turbine en fonction de la température à l'entrée de la turbine.

La **figure (III.7)** montre la variation du travail de la pompe en fonction de la température à l'entrée de la turbine. Dans la pompe on a un processus de compression isentropique de l'eau, on remarque que le travail de la pompe reste constant et n'a rien à voir avec les changements de la température de la vapeur à l'entrée de la turbine, alors que la fonction de la pompe est liée à l'eau et non à la vapeur.

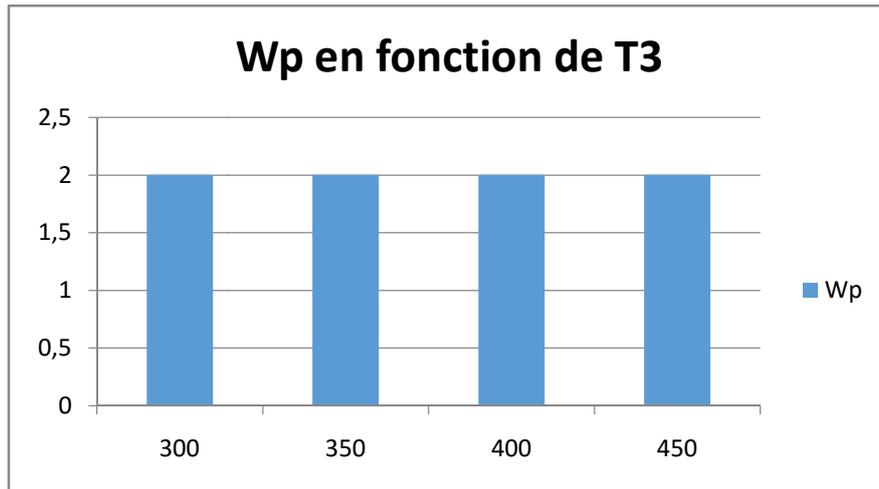


Figure (III.7) : Travail de la pompe en fonction de la température à l'entrée de la turbine.

La figure (III.8) montre la variation du rendement thermique du cycle en fonction de température à l'entrée de la turbine. On remarque que le rendement thermique augmente avec l'augmentation de cette température « T<sub>3</sub> ». En se référant à l'équation :  $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$ , En raison de l'augmentation de la température à l'entrée de la turbine « T<sub>3</sub> », Le travaille net « W<sub>net</sub> » augmente, et aussi l'énergie entrante « Q<sub>in</sub> » augmente, mais l'augmentation du travail net est supérieure à l'augmentation de l'énergie entrante, et donc l'efficacité «  $\eta_{th}$  » augmente.

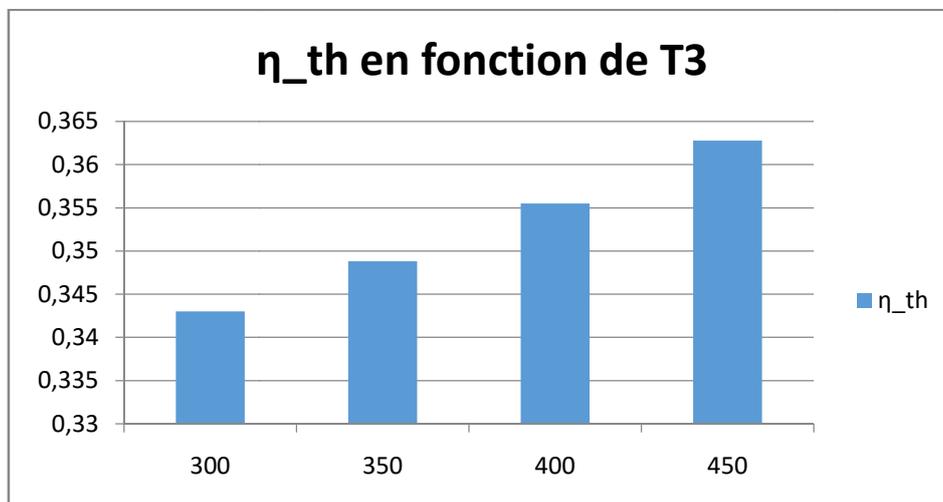


Figure (III.8): Rendement thermique en fonction de la température à l'entrée de la turbine.

**b. Effet de l'effet de la pression dans le condenseur**

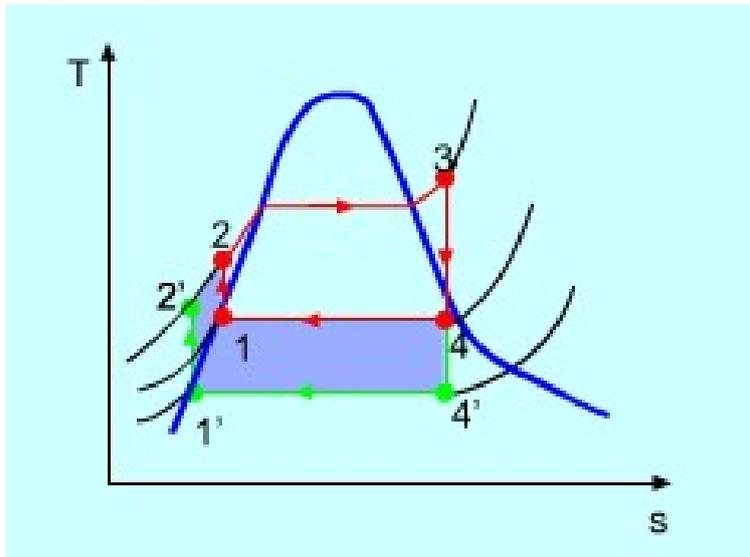
La même turbine à vapeur avec:  $P_4 =$  (pression dans le condenseur :  $P_4 = 3.5, 5, 6.5, 8$  kPa)

- **Performances du cycle de Hirn en fonction de «  $P_4$  »**

Le **tableau (III.3)** présente les performances du cycle de Hirn en fonction de la pression dans le condenseur «  $P_4$  ».

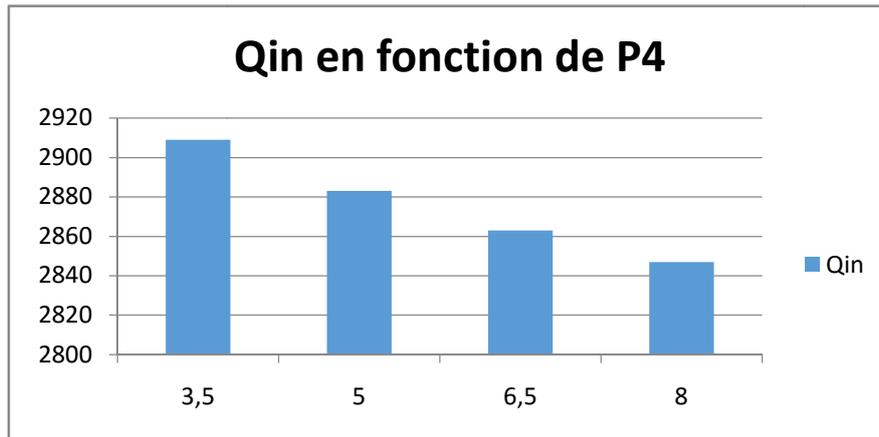
$P_4$ [kPa]	$Q_{in}$ [kJ/kg]	$Q_{out}$ [kJ/kg]	$W_{net}$ [kJ/kg]	$W_t$ [kJ/kg]	$W_p$ [kJ/kg]	$\eta_{th}$ %
3,5	2909	1911	997,7	999,7	2,003	34,3
5	2883	1925	958,4	960,4	2,006	33,24
6,5	2863	1934	928,6	930,6	2,007	32,43
8	2847	1942	904,5	906,6	2,009	31,77

**Tableau (III.3):** Performances du cycle de Hirn en fonction de la pression dans le condenseur.



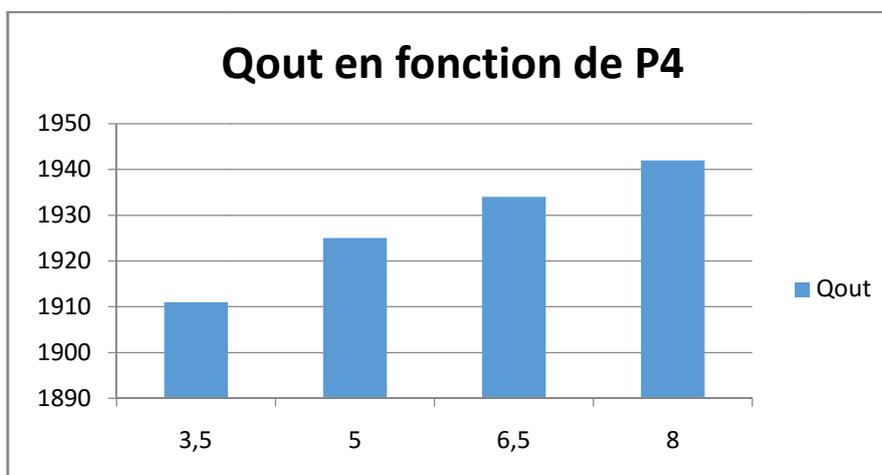
**Figure (III.9) :** Diagramme T-S de Hirn avec changement de la pression dans le condenseur.

La **figure (III.10)** montre la variation de l'énergie thermique entrante «  $Q_{in}$  » du cycle en fonction de la pression dans le condenseur «  $P_4$  ». On remarque une diminution d'énergie thermique entrante avec l'augmentation de la pression dans le condenseur. Lorsque la pression du condenseur diminue (processus 2'-3), il y a une augmentation de la quantité de chaleur ajoutée dans la chaudière «  $Q_{in}$  » et l'inverse est vrai dans le cas d'une augmentation de la pression, une diminution de l'énergie entrante «  $Q_{in}$  » dans la chaudière (processus 2-3), voir **figure (III.9)**.



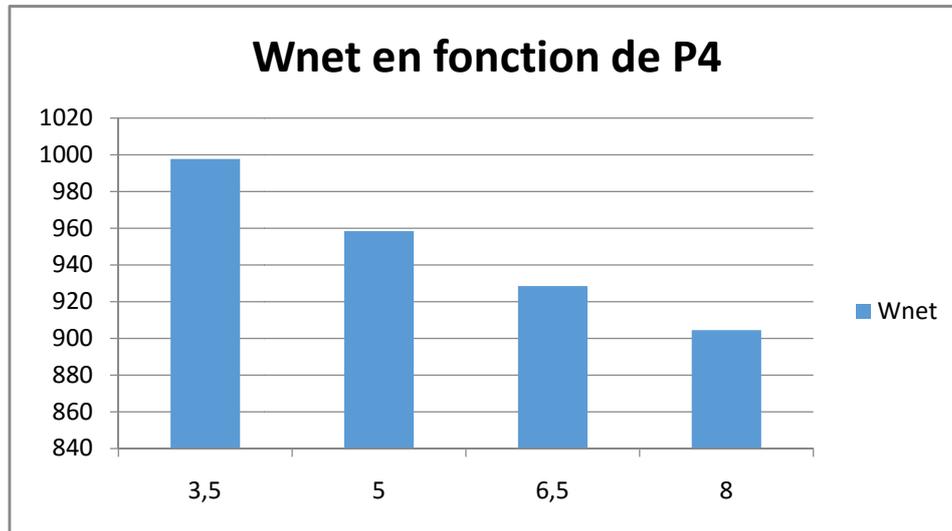
**Figure (III.10):** Energie thermique entrante en fonction de la pression dans le condenseur

La **figure (III.11)** montre la variation de l'énergie thermique perdue «  $Q_{out}$  » du cycle en fonction de la pression dans le condenseur «  $P_4$  ». On remarque une augmentation d'énergie thermique perdue avec l'augmentation de pression dans le condenseur. Lorsque la pression du condenseur augmente, la vapeur se détend moins dans la turbine, donc la vapeur ne perd pas beaucoup d'énergie pour sortir à une température plus élevée, donc le «  $Q_{out}$  » augmente plus on augmente la pression du condenseur.



**Figure (III.11):** Energie thermique perdue en fonction de la pression dans le condenseur.

La **figure (III.12)** montre la variation du travail net du cycle en fonction de la pression dans le condenseur. On remarque quand on augmente la pression, le travail net du cycle diminue. En se référant à l'équation :  $W_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}$ . En raison de l'augmentation de la pression dans le condenseur « $P_4$ », l'énergie entrante « $Q_{\text{in}}$ » diminue, mais l'énergie perdue « $Q_{\text{out}}$ » augmente, donc le travail net « $W_{\text{net}}$ » diminue.



**Figure (III.12):** Travail net en fonction de la pression dans le condenseur.

La **figure (III.13)** montre la variation du travail de la turbine en fonction de la pression dans le condenseur, On remarque une diminution du travail de la turbine avec l'augmentation de la pression dans le condenseur « $P_4$  ». En abaissant la pression du condenseur, la vapeur est condensée à une pression plus basse, ce qui entraîne une plus grande expansion à travers la turbine, ce qui augmente le travail effectué par la turbine. Cela peut être facilement visualisé à travers le diagramme T-S de Rankine Cycle, **voir figure (III.9)**. Si vous abaissez la ligne 4–1 vers 4'-1' dans le diagramme, de sorte que vous abaissez la pression à laquelle la vapeur se condense, le travail effectué par la turbine dans la ligne 3–4 augmentera, ce qui entraînera un travail plus important de la turbine (plus de puissance de travail).

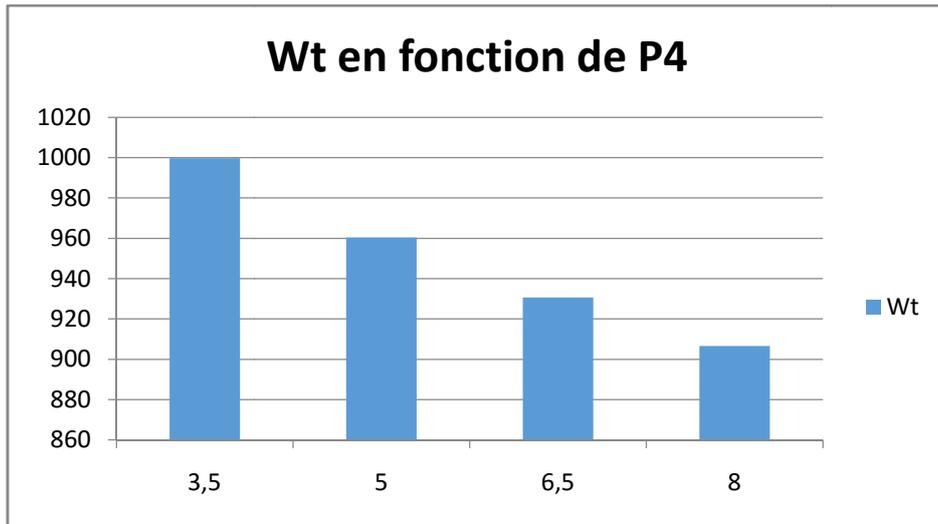


Figure (III.13): Travail de la turbine en fonction de la pression dans le condenseur.

La figure (III.14) montre la variation du travail de la pompe en fonction de la pression dans le condenseur. Dans la pompe, on a un processus de compression isentropique de l'eau, on remarque que le travail de la pompe reste presque constant et n'a rien à voir avec les changements de la pression dans le condenseur, alors que la fonction de la pompe est indépendante des changements dans le condenseur et liée à l'eau et non à la vapeur.

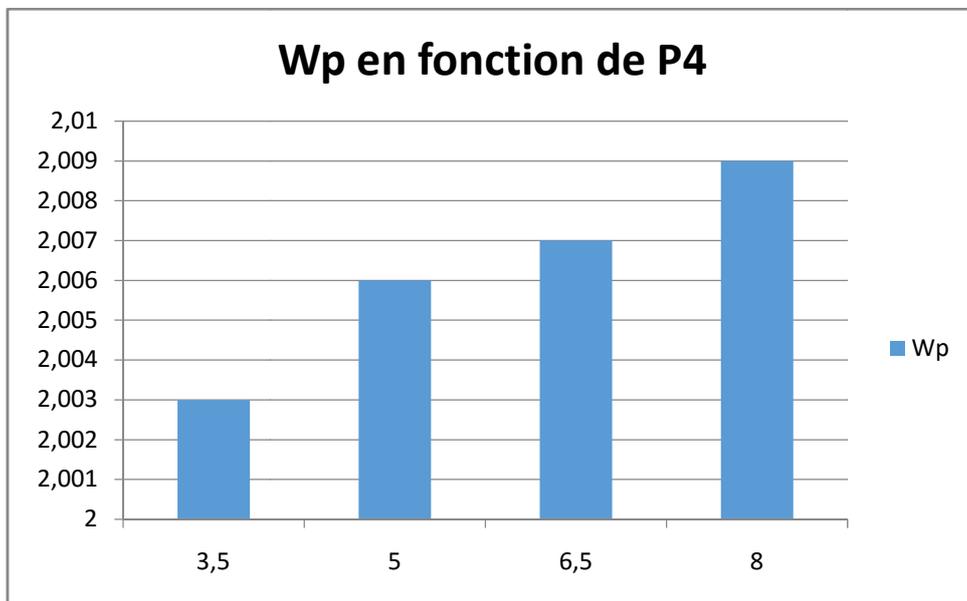


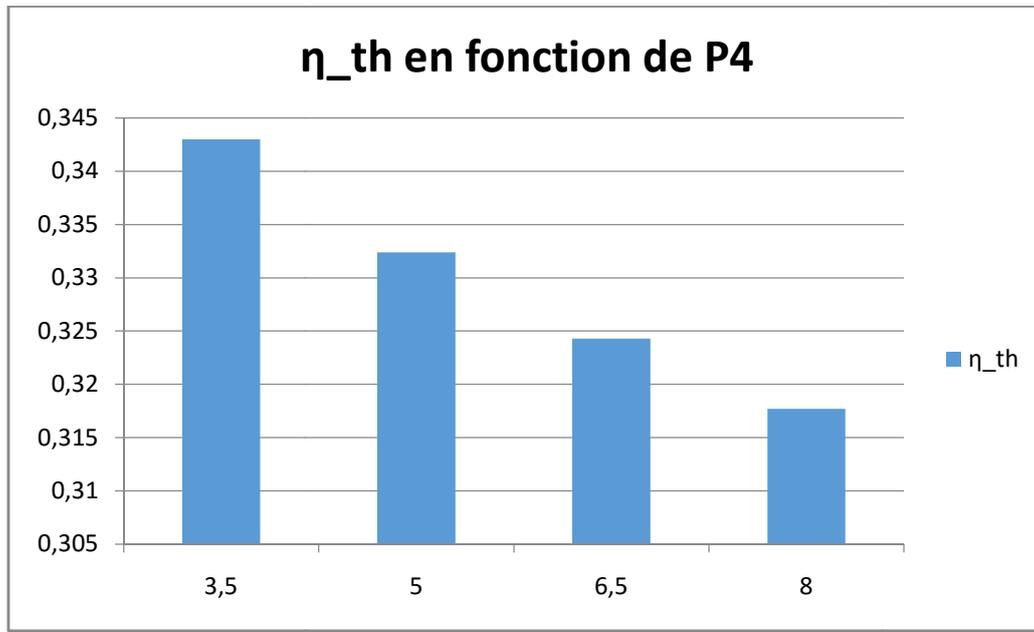
Figure (III.14): Travail de la pompe en fonction de la pression dans le condenseur.

La figure (III.15) montre la variation du rendement thermique du cycle en fonction de la pression dans le condenseur « P<sub>4</sub> ». On remarque une diminution de rendement thermique

### Chapitre III : Résultats et discussions

---

avec l'augmentation de cette pression, En se référant à l'équation :  $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$ , En raison de l'augmentation de la pression dans le condenseur «  $P_4$  ». Le travail net «  $W_{net}$  » diminue, et aussi l'énergie entrante «  $Q_{in}$  » diminue, mais la diminution du travail net est supérieure à la diminution de l'énergie entrante, et donc l'efficacité «  $\eta_{th}$  » diminue.



**Figure (III.15):** Rendement thermique en fonction de la pression dans le condenseur.



**Conclusion générale**

### Conclusion générale

Dans ce travail on a présenté une étude thermodynamique des performances des cycles de Rankine idéal simple et Rankine avec surchauffe (cycle de Hirn) avec le logiciel de calcul EES (Engineering Equation Solver), ainsi que une étude des effets sur les performances du cycle de Hirn, qui est l'effet de la température à l'entrée de la turbine et l'effet de la pression dans le condenseur.

Les conclusions de cette étude sont:

- Le cycle de Rankine avec surchauffe améliore vraiment le rendement thermique par la l'augmentation de la température à l'entrée de la turbine, ce qui rend à une augmentation de l'énergie entrante et une diminution de l'énergie perdue, ce qui augmente le travail net, et donc obtenue une augmentation à l'efficacité de cycle.
- Mais au contraire, l'augmentation de la pression de condenseur affecte négativement sur l'efficacité du cycle, ce qui rend à une diminution de l'énergie entrante et une augmentation de l'énergie perdue, ce qui diminue le travail net, et donc une diminution à l'efficacité de cycle.

**Références bibliographiques**

## *Références bibliographiques*

- [1] H.Benslimane, " Etude et amelioration du renedement de la centrale électrique de Jijel", Mémoire de master, Université Badji mokhtar Annaba, 2017.  
Thermodynamique et installations energetiques, Dr.Benzerdjeb
- [2] Abd el ouahab, 2017.  
Thermodynamiques et energetiques, Les cycles moteurs à vapeur les cycles
- [3] TGV, Editions H. Jeanmart , 2011-2012.  
Pinel patrice, Brève introduction à EES et à ses principales commandes et fonctions, automne 2001.
- [4] Cycles thermodynamiques des machines thermiques, Eric Goncalvès da Silva, Jean-Paul Thibault , octobre 2008, page 107,109.
- [5] E E S Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows, S.A. Klein et F.L. Alvarado. 1198.
- [6] Site web en ligne:( <http://enim-s-web.enim.site.univ-lorraine.fr> ).
- [7] Site web en ligne: <https://www.thermal-engineering.org/>).
- [8] Site web en ligne <http://www.gamblewiz.com>).
- [9] Manuel EES version PDF disponible à même le logiciel EES.
- [10] Site web en ligne:(<https://fr.wikipedia.org>).