

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DELA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ MOULOUD  
MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE LA  
CONSTRUCTION



# MEMOIRE



*de fin d'études*

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Spécialité : Génie Mécanique*

*Option : Energétique*

## *Thème*

Etude et programmation des cycles  
thermodynamiques d'une turbine à  
vapeur.

Présenté par : BRIKI Farid

Devant les jurys composés de : .....

Président : .....

Rapporteur : .....

Examineur : .....

Année Académique 2020-2021

# Sommaire

Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I : Présentation générale de la centrale thermique CAP DJINET</b>	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Présentation de L'organisme D'accueil.....	03
I.2. Description et Caractéristiques de la centrale .....	04
I.2.1. Structure générale.....	04
I.2.2. Combustible.....	05
I.2.3. Chaudière (générateur de vapeur SGP).....	05
I.2.4. Condenseur.....	08
I.2.5. Pompe.....	08
I.2.6. Groupe turbo-alternateur.....	08
I.2.7. Eau de réfrigération (eau de mer).....	11
I.2.8. Station de dessalement de l'eau de mer.....	11
I.2.9. Les auxiliaires communs aux quatre (4) tranches.....	11
I.3. Principe générale de fonctionnement de la centrale CAP-DINET.....	13
I.4. Conclusion.....	14
<b><i>Chapitre II : Cycle thermodynamique d'une centrale thermique à vapeur</i></b>	
Introduction .....	16
II-2-Les cycles thermodynamiques .....	17
II-2-1-Cycle de Carnot.....	17
II.2.2. Cycle de Rankine.....	18
II.2.3. Cycle de Hirn.....	21
II.2.4. L'effet des irréversibilités sur le cycle de Rankine.....	21
II.2.5. Cycle Rankine à resurchauffe.....	22
II. 2.5. Cycle de Rankine à un soutirage.....	25

**Chapitre III :**

***Elaboration d'un programme pour l'étude de puissance à vapeur à deux soutirages***

III. Introduction .....	29
III.2. Programmation de cycle de Rankine à un soutirage.....	29
III.2.1 Utilisation.....	29
III.2.2. L'organigramme du programme.....	30
III.2.3. Application numérique et programmation par MATLAB.....	34
III.3. Programmation de cycle de Rankine à deux soutirages.....	36
III.3.1 Utilisation .....	36
III.3.2. L'organigramme du programme .....	36
III.3.3. Application numérique et programmation par MATLAB.....	41
Conclusion générale .....	43

# Liste de figures

<b>Fig I.1</b>	Plan de masse	03
<b>Fig I.2</b>	LA Chaudière de la centrale de Cap Djinet	06
<b>Fig I.3</b>	Vue générale de condensateur de la centrale	08
<b>Fig I.4</b>	Photo réelle du Groupe turbo-alternateur de la centrale	09
<b>Fig I.5</b>	Photo réelle du corps BP de la turbine (double flux)	09
<b>Fig I.6</b>	Schéma synoptique d'une tranche thermique	12
<b>Fig I.7</b>	Schéma conceptuel d'une centrale thermique à vapeur	14
<b>Fig II.1</b>	Diagramme entropique du cycle de Carnot	17
<b>Fig II.2</b>	Schéma d'un cycle de Rankine [9]	18
<b>Fig II.3</b>	diagramme T.S de cycle de Rankine [10]	19
<b>Fig II.4</b>	Diagramme T.S de cycle de Hirn [11]	21
<b>Fig II.5</b>	L'effet des irréversibilités sur le cycle idéal de Rankine [10]	22
<b>Fig II.6</b>	schéma de cycle à resurchauffe [9].	23
<b>Fig II.7</b>	Le cycle de Rankine à resurchauffe [10]	23
<b>Fig II.8</b>	schéma de cycle de Rankine à soutirage [13].	25
<b>Fig II.9</b>	Diagramme T-s du cycle à un soutirage de vapeur [10].	26
<b>Fig III.1</b>	Diagramme T-s du cycle à un soutirage de vapeur [10].	30
<b>Fig III.2</b>	Organigramme du calcul pour le cycle à un soutirage	33
<b>Fig III.3</b>	Diagramme T-s de l'application	34
<b>Fig III.4</b>	Schéma du cycle de Rankine à deux soutirages.	36
<b>Fig III.5</b>	Organigramme de cycle à deux soutirages.	40
<b>Fig III.6</b>	Diagramme T-s du l'application à deux soutirage.	41

# Liste des tableaux

<b>Tab I.1</b>	Les intitulés du plan de masse	04
<b>Tab III.1</b>	Résultats numérique d'exécution du programme	35
<b>Tab III.2</b>	Résultats numérique d'exécution du programme à deux soutirages	42

# *Remerciements*

*Je veux remercier en premier lieu mon encadreur  
Dr. K. BEN ALLA pour l'aide qu'il m'a  
prodigué.*

*Mr MESSAD Ahmed pour son aide et  
encouragement.*

*Mes vifs et sincères remerciements à mes chers  
parents, ma famille.*

*Ma profonde gratitude s'adresse aussi à tous  
ceux qui ont participé de près ou de loin à  
l'élaboration de ce modeste travail*

### Introduction générale

Une turbine à gaz est une machine thermique servant à la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique utile. Elle 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. En raison de cette grande importance, l'ingénieur de 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.

La centrale thermoélectrique de Cap-Djinet a été construite dans le but de produire cette énergie à partir d'un circuit fermé comportant un générateur de vapeur, une turbine à vapeur, un condenseur, des pompes et des conduites reliant ces éléments.

Dans le générateur de vapeur l'énergie thermique obtenue par la combustion d'un combustible (gaz, fuel) est transmise à l'eau et ensuite transformé en énergie mécanique dans une turbine, puis en énergie électrique à l'aide d'un alternateur.

Dans ce cadre, ce travail a pour objectif D'étudier et d'élaborer des programmes qui permettent de calculer les bilans énergétiques des principaux cycles théoriques de puissance à deux phases.

Compte tenu de notre objectif, le mémoire s'articule autour des points suivants:

- Le premier chapitre donne une description générale sur la centrale thermique de CAP DJINET ainsi une description technologique sur les turbines à vapeur.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des principaux cycles thermodynamique des turbines à vapeur
- Le dernier chapitre est réservé à la partie de programmation et calcul.

***Chapitre I :***  
***Présentation générale***  
***d'une centrale***  
***thermique CAP-***  
***DJINET***

### I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'organisme d'accueil, et lieu de déroulement de notre projet de fin d'études : la centrale thermique de RAS DJINET, où il sera question d'exposer le processus de production de l'électricité, principale activité de la centrale.

### I.2. Présentation de l'organisme d'accueil

La centrale thermique se situe au bord de la mer, à 80 km à l'est d'Alger. Elle est installée sur une superficie de 35 hectares à Cap-Djinet, wilaya de Boumerdes. Elle comprend 4 groupe de 176 MW chacun, soit une puissance électrique totale de 704 MW. La puissance fournie au réseau est de 672 MW, le reste, (environ 32 MW), est consommé par les auxiliaires.

Cette centrale est construite entre 1980 et 1986, afin de renforcer l'alimentation en énergie électrique du pays. La première tranche d'énergie fournie au réseau de distribution a été effectuée le 17 juin 1986.

C'est une centrale thermique à vapeur qui utilise l'eau comme caloporteur d'énergie à haute température et sous pression.

La centrale comprend plusieurs éléments qui définissent les différentes stations existantes et les différents mécanismes qui assurent le bon fonctionnement de cette dernière. Ces stations sont résumées comme suit (Figure I.1).

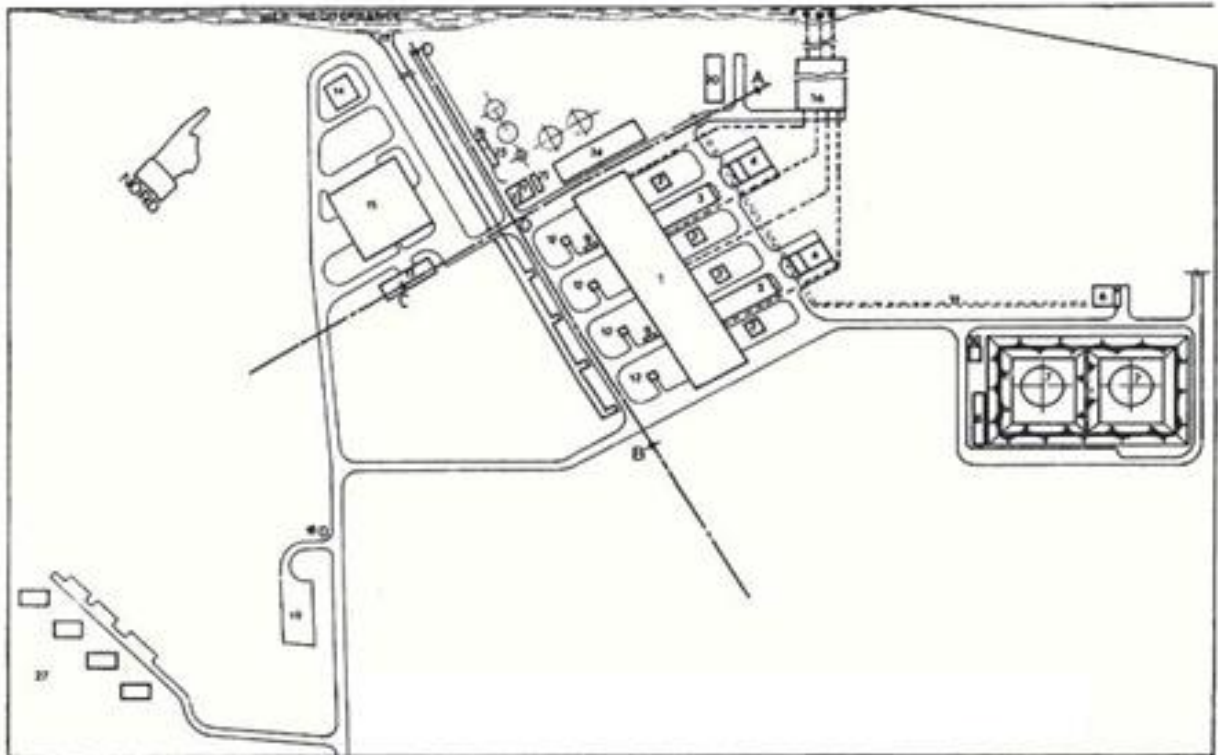


Figure I.1 : Plan de masse

1. Salle des machines.	14. Atelier magazine.
2. Chaudière.	15. Station de pompage.
3. Locaux des auxiliaires électriques.	16. Canal et rejet d'eau de mer.
4. Locaux des auxiliaires mécaniques.	17. Potier (poste d'entrée).
5. Tour de prise d'eau de mer.	18. Parc véhicules.
6. Station de détente de gaz.	19. Station de chloration.
7. Réservoir stockage fuel.	20. Préparation d'eau potable.
8. Station pompage et dépotage fuel. Station de production H2.	21. Déminéralisation.
9. Poste d'incendie à mousse,	22. Fosse de neutralisation.
10. Rack à tuyauterie.	23. Dessalement d'eau de mer.
11. Air des transformateurs.	24. Station des pompes d'incendie.
12. Bâtiment administratif.	25. Pompe d'eau déminéralisée.
13. Cantine.	26. Logement d'exploitation.
	27. Station de production.

**Tableau I.1 : Les intitulés du plan de masse**

## I.2. Description et Caractéristiques de la centrale

### I.2.1. Structure générale

La centrale de production d'électricité de Cap-Djinet est une centrale composée de quatre groupes d'une puissance unitaire de 176 MW comprenant des installations communes :

- Station de pompage d'eau de mer
- Poste de détente gaz naturel,
- Poste fuel,
- Station de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer,
- Station d'électro-chloration,
- Salle de compresseurs d'air comprimé de travail et de régulation

#### Et pour chaque groupe :

- Générateur de vapeur,
- Turbine à vapeur,
- Condenseur,
- Alternateur,
- Auxiliaire électrique,

- Salle de commande centralisée
- Transformateur principal d'évacuation de l'énergie
- Dessalement de l'eau de mer
- Les pompes

**Les équipements les plus importants dans la centrale thermique sont :**

- Le condenseur
- Les pompes d'extractions
- La bêche alimentaire
- Les pompes alimentaires
- Les pompes de circulations
- La chaudière
- La turbine
- L'alternateur
- Les réchauffeurs

### **I.2.2 Combustible**

Le combustible utilisé par les chaudières, est le gaz naturel de Hassi-R'mel acheminé par gazoduc.

Le secours est assuré par du fuel oil domestique stocké dans deux (02) réservoirs de 10 000 m<sup>3</sup> chacun.

### **I.2.3 Chaudière (générateur de vapeur SGP)**

Construite en hauteur dont laquelle on brûle le combustible. La chaleur est transférée à l'eau circulant dans une série de tubes qui entourent les flammes.

La chaudière a pour rôle de transformer l'eau en vapeur à haute pression pour alimenter le groupe turbine alternateur.



**Figure I.2 : LA Chaudière de la centrale de Cap Djinet**

➤ **Constitution de la chaudière :**

**1. Ballon (réservoir) :**

Contenant de l'eau et de la vapeur à haute pression. Il constitue à la fois le point de départ de la vapeur vers les turbines et le récepteur de l'eau d'alimentation de retour.

**2. Surchauffeurs :**

Ce sont des échangeurs de chaleur, se composent d'une série de tube entourant le feu, provoquent une forte augmentation de la température de vapeur (200°C environ). Cela assure une vapeur qui est absolument sèche et donne un meilleur rendement thermique.

**3. Resurchauffeurs :**

Ce sont des échangeurs de chaleur dont lesquels, une partie de la vapeur qui est passé par la turbine HP réchauffe l'eau d'alimentation. Le rendement thermique ainsi obtenu est

meilleur que si la vapeur dérive dans le resurchauffeur allait aux turbines moyennes pression (MP) et basse pression (BP).

#### **4. Désurchauffeurs :**

Ils sont alimentés par l'eau courante et utilisés pour la stabilisation de la température de la vapeur. Ils sont placés entre les surchauffeurs et resurchauffeurs.

#### **5. Economiseur :**

Réchauffe l'eau d'alimentation à partir de la chaleur des fumées qui se trouvent dans le foyer de la chaudière pour gagner la chaleur perdue donc économiser du gaz.

#### **6. Brûleurs :**

Chaque tranche contient 8 brûleurs, répartis sur les faces avant et arrière de la chambre de combustion. Ils provoquent la combustion du gaz ou du mazout projeté à l'intérieur de la chaudière.

#### **7. Colonnes de descente et tubes écrans :**

Les colonnes de descente sont raccordées à la partie inférieure du ballon et conduisent l'eau à l'écran vaporisateur.

L'eau se trouvant dans l'écran vaporisateur va être ainsi chauffée directement par rayonnement et va se vaporiser en partie.

Les tuyaux vaporisateurs sont soudés et étanches au gaz, ils forment la seconde surface de chauffage après l'économiseur.

#### **8. Ventilateurs de recyclages :**

Ils ont pour rôle de recycler en fonction de la charge, une partie des fumées issues de la combustion afin de régler la température à la sortie de resurchauffeur.

#### **9. Ventilateurs de soufflages :**

Ils ont pour rôle, de fournir l'air de combustion nécessaire au générateur de vapeur.

#### **10. Préchauffeurs d'air à vapeur :**

Servent à l'augmentation de la température de l'air de combustion.

#### **11. Réchauffeur rotatif d'air de combustion :**

Sert à réchauffer l'air de combustion par récupération de chaleur des fumées.

### I.2.5. Condenseur

C'est un échangeur de chaleur, il provoque la condensation de la vapeur, grâce à la circulation d'eau froide venant de la mer et circulant dans les 15000 tubes qui se trouve à l'intérieur du condenseur.



Figure I.3 : Vue générale de condenseur de la centrale

### I.2.6. Pompe

Trois types de pompes existent

- 1) **Pompes alimentaires** : elles refoulent l'eau de la bache alimentaire vers la chaudière.
- 2) **Pompes d'extractions** : elles aspirent le condensât principal de puits du condenseur à la bache alimentaire.
- 3) **Pompes de circulation** : elles refoulent l'eau de mer de la station de pompages aux condenseurs.

### I.2.7. Groupe turbo-alternateur

#### a) La turbine à vapeur

La turbine transforme l'énergie thermique contenue dans la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre. Le travail mécanique obtenu sert à entraîner l'alternateur. La turbine étudiée dans ce mémoire est constituée de trois (03) corps :

HP, MP et BP, elle contient aussi six (06) soutirages de vapeur : alimentant 03 réchauffeurs BP, la bêche alimentaire et 02 réchauffeurs HP

### ➤ Caractéristiques

- ☞ Longueur : 16,125 m
- ☞ Largeur : 13 m
- ☞ Poids : 500 103 Kg
- ☞ Puissance : 176 MW
- ☞ Pression : 138,2 bars
- ☞ Température vapeur : 535 °C
- ☞ Vitesse de rotation : 3000 T/mn



Figure I.4 : Photo réelle du Groupe turbo-alternateur de la centrale



Figure I.5 : Photo réelle du corps BP de la turbine (double flux)

- **Le corps haute pression (HP) :** Il est à simple flux et sa construction, en forme de tonneau lui assure un fonctionnement Souple, l'enveloppe interne à plan de joint axial est montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques. Sa pression de fonctionnement est de **172 bars**.
- **Le corps moyen pression (MP) :** Il est à double flux, l'enveloppe externe qui porte l'enveloppe interne à un plan de joint horizontal. Sa pression de fonctionnement est de **48 bars**.
- **Le corps basse pression (BP) :** Il est à double flux et est constitué de trois enveloppes à plan de joint horizontal l'enveloppe interne, suspendue dans l'intermédiaire, porte les premiers étages des aubes directrices.

La turbine est dotée d'une régulation électro hydraulique lui permettant d'être réglé à la vitesse nominale de **3000t/min**.

### **b) Alternateurs (SIEMENS Autriche)**

Les alternateurs sont à refroidissement à l'hydrogène sous pression de 03 bars en circuit fermé, l'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction.

#### ➤ **Les caractéristiques de l'alternateur :**

La puissance maximale produite est de : 176 MW.

La tension : 15.5 KV.

La fréquence : 50Hz.

L'intensité du courant : 8195 A.

### **c) L'excitatrice :**

L'énergie nécessaire à l'excitatrice est prélevée sous forme mécanique sur l'arbre du groupe, la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique continue s'effectue en utilisant un alternateur et des diodes.

L'alternateur principal contient l'inducteur principal fixe et l'induit tournant, ce dernier est alimenté par des diodes qui sont elles-mêmes alimentées par l'alternateur principal.

L'énergie nécessaire à l'excitation de l'alternateur est fournie par un alternateur pilote dont l'inducteur est constitué par un aimant.

### I.2.8. Eau de réfrigération (eau de mer)

La prise d'eau se situe en mer à 900m de la station de pompage et de filtration. L'eau arrive par trois conduites d'amener d'eau de mer.

### I.2.9. Station de dessalement de l'eau de mer

La station de dessalement a pour rôle, la production d'eau dessalée à partir de l'eau de mer. Elle est constituée de quatre unités de dessalement produisant chacune 500m<sup>3</sup>/j assurent la production en eau dessalée puis stockée dans deux bâches (2x2700m<sup>3</sup>).

Les trois produits chimiques qui sont injectés pour le traitement de l'eau sont :

- Le belgard EVN : c'est un inhibiteur d'incrustation utilisé pour éviter l'entartrage.
- La belite (M33) : c'est un produit anti-mousse utilisé pour éviter la formation du mousse au niveau des évaporateurs.
- Le bissulfite de sodium (NA<sub>2</sub>S<sub>03</sub>) : c'est un produit permettant l'élimination de chlore dans l'eau pour diminuer la conductivité.

### I.2.11. Les auxiliaires communs aux quatre (4) tranches

- **La station de production d'hydrogène** : Elle sert à produire de l'hydrogène nécessaire au refroidissement des quatre alternateurs de la centrale.
- **Le poste de détente gaz** : Il compose de deux lignes de filtration gaz et trois lignes de régulation pour la détente gaz de 60 à 6 bars.
- **Le poste de dépotage et transfert fuel** : Il est constitué de deux bâches de stockage de capacité 2x10000m<sup>3</sup>.

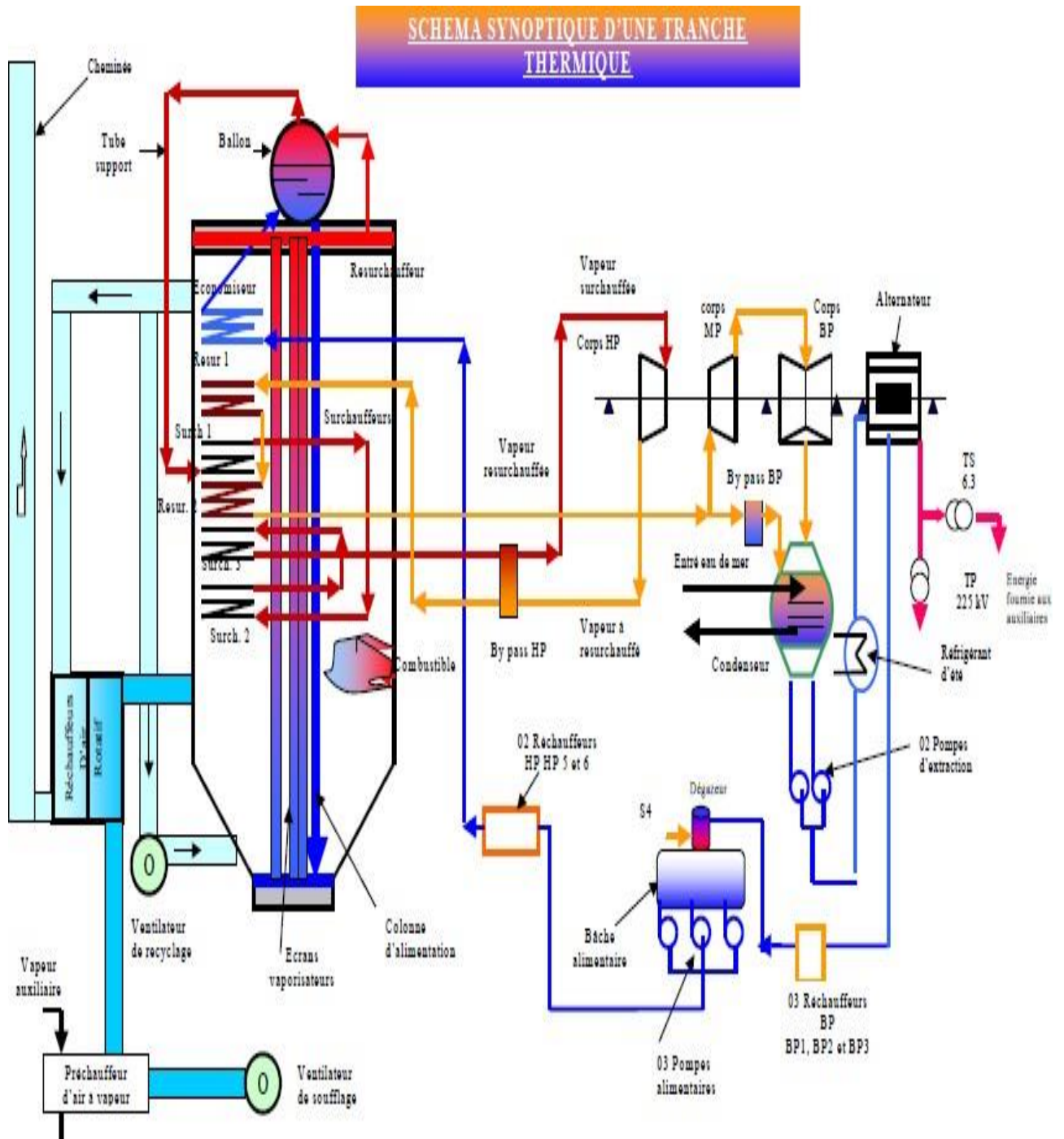


Figure I.6 : Schéma synoptique d'une tranche thermique

### I.3. Principe générale de fonctionnement de la centrale CAP-DINET

Le processus de production d'électricité à partir de la technologie de centrale à vapeur, utilisant l'une des sources d'énergie, comporte essentiellement quatre étapes ; dans la première étape, l'énergie chimique stockée dans le fuel par exemple est convertie en énergie thermique dans une chaudière. Dans la deuxième étape, la vapeur surchauffée produite dans le générateur de vapeur (chaudière) est acheminée vers la turbine à vapeur, qui entraîne le générateur de courant. Eventuellement, après avoir quitté la turbine à haute pression (THP), la vapeur est réchauffée dans le générateur de vapeur et alimente la turbine à moyenne pression (TMP).

Dans la turbine basse pression (TBP), la vapeur provenant directement du réchauffeur se détend à la pression du condenseur et condensée dans le condenseur. Un système d'eau de refroidissement est utilisé pour le refroidissement du condenseur. La condensation recueillie dans le puits chaud du condenseur est évacuée par les pompes à condensat et acheminée par les réchauffeurs de condensat dans le réservoir d'eau d'alimentation. L'eau d'alimentation est chauffée par la vapeur de la turbine (soutirage) et les gaz dissous de l'eau d'alimentation sont libérés (en option pour améliorer l'efficacité de la centrale). Ensuite, les pompes d'alimentation de la chaudière évacuent l'eau d'alimentation du réservoir d'eau d'alimentation vers l'économiseur via les réchauffeurs HP. La vapeur commence à se produire à partir de ce point.

Le mélange vapeur-eau à haute température est ensuite converti en vapeur dans les parois de l'eau et passe finalement par la section des surchauffeurs pour convertir la vapeur saturée en vapeur surchauffée [7]. Le schéma représentant les processus de cette technologie est montré dans la figure I.8.

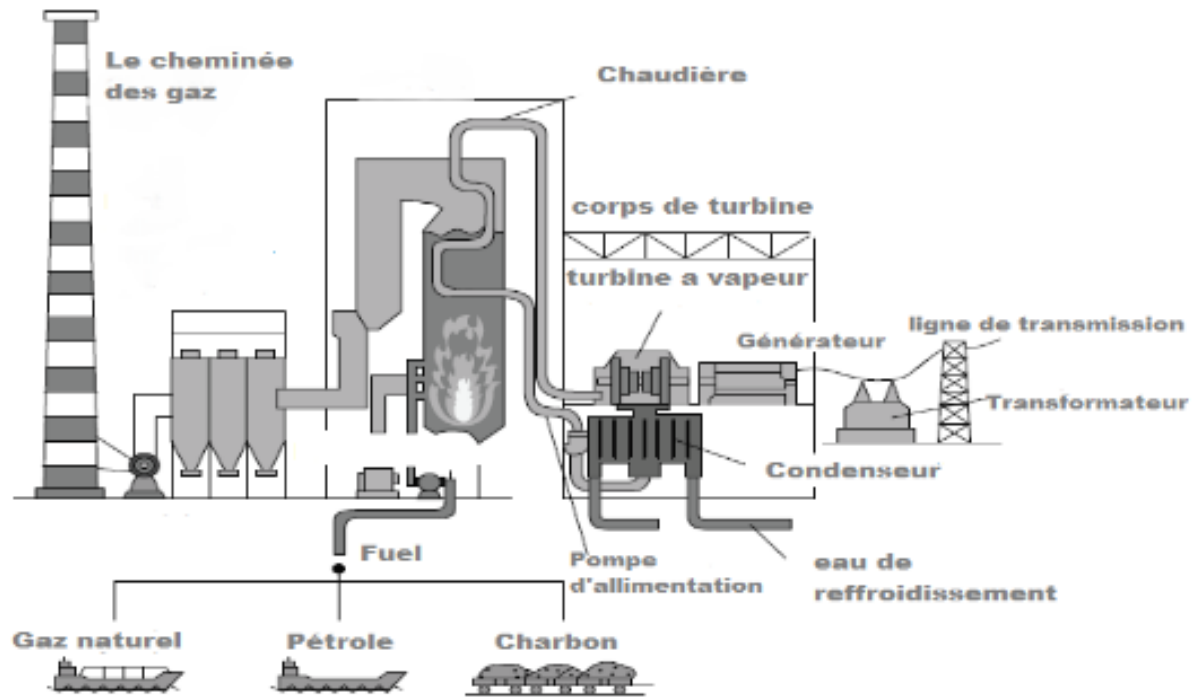


Figure I.7 : Schéma conceptuel d'une centrale thermique à vapeur

#### I.4. Conclusion

Ce chapitre fût une présentation générale de l'organisme d'accueil, et du processus de production de l'électricité au sein de la Centrale Thermique de Cap Djinet, ainsi que le système étudié. Dans le chapitre qui suit, nous allons expliciter le cycle thermodynamique de la centrale thermique.

***Chapitre II :***  
***Cycle***  
***thermodynamique***  
***d'une centrale***  
***thermique à vapeur***

### Introduction

Les groupes Turboalternateurs sont des machines à grande puissance, destinés à la production de l'énergie électrique nécessaire à la vie quotidienne et au développement industriel. La puissance unitaire des groupes générateurs, la structure des réseaux et des centrales, ont considérablement évolué depuis les débuts de l'électrification. Dans chaque pays ces facteurs dépendent des ressources locales et l'état de développement du pays.

Dans les pays à forte industrialisation, où les ressources hydrauliques sont déjà largement exploitées, la production d'électricité s'effectue actuellement dans le monde à partir des centrales thermiques. Celles-ci peuvent être à énergie nucléaire, à charbon ou à gaz, dans les centrales thermiques à vapeur (installations motrices à vapeur, IMV), cette dernière est produite dans des générateurs qui peuvent être des réacteurs nucléaires, des chaudières utilisant le charbon ou le gaz naturel comme combustible quoique les turbines à gaz commencent à prendre une part importante, la production mondiale reste assurée par des centrales à vapeur.

En Algérie, les centrales thermiques à vapeur sont construites généralement en bord de mer à cause du déficit que connaît le pays en ressources hydrauliques ; notamment si la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique n'est possible industriellement qu'en passant par les transformations suivantes :

- Transformation d'énergie chimique en énergie calorifique.
- Transformation d'énergie calorifique en énergie mécanique.
- Transformation d'énergie mécanique en énergie électrique.

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations successives qui part d'un système thermodynamique dans un état donné, le transforme et le ramène finalement à son état initial, de manière à pouvoir recommencer le cycle. Au cours du cycle, le système voit sa température, sa pression ou d'autres paramètres d'état varier, tandis qu'il échange du travail et réalise un transfert thermique avec l'extérieur.

- **Cycle ouvert** : Une partie des échanges de chaleur se fait par transfert de matière. C'est le cas des moteurs Thermiques qui laissent échapper les gaz dans l'atmosphère.
- **Cycle fermé** : Toute la matière est conservée. Si on fait le bilan pour revenir à chaque point, on vérifie le premier principe de la thermodynamique

## II-2-Les cycles thermodynamiques

### II-2-1-Cycle de Carnot :

Le cycle de Carnot est le cycle à rendement maximum et sert de ce fait de cycle de référence, auquel on compare tous les autres cycles, pour évaluer leurs performances. Il est formé successivement (figure II-1) :

- D'une compression isentropique (1-2).
- D'une compression isotherme (2-3).
- D'une détente isentropique (3-4).
- D'une détente isotherme (4-1).

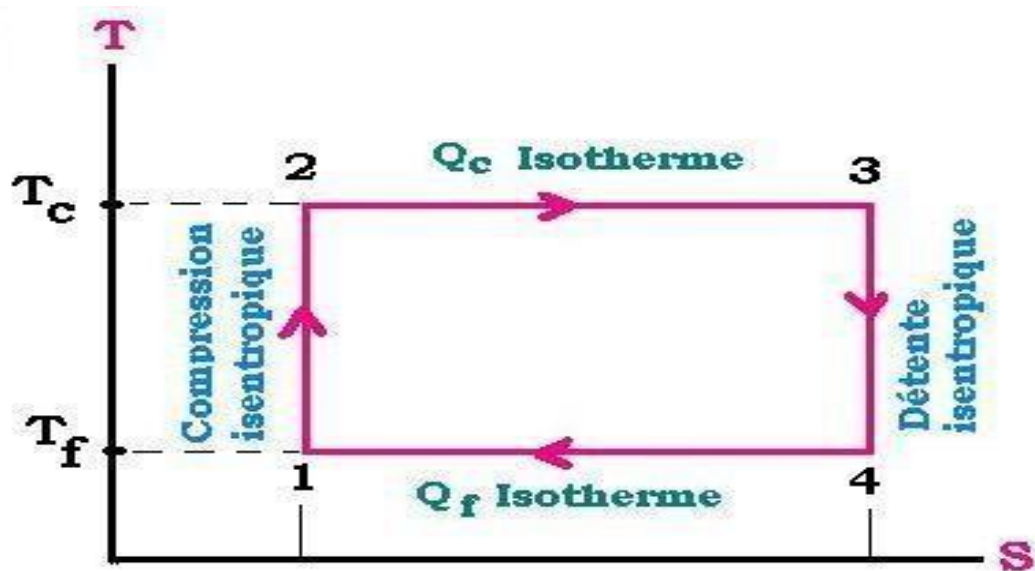


Figure II.1 : Diagramme entropique du cycle de Carnot

## II.2.2. Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine peut être considéré comme le cycle de base des turbines à vapeur. Il est constitué par deux transformations isobares (Pression constante) et deux transformations isentropiques (entropie constant).

Un cycle classique de Rankine élémentaire comprend une pompe de circulation, une source de chaleur (générateur de vapeur, foyers, etc.), une turbine pour la conversion de l'énergie thermique en énergie cinétique de rotation, et un condenseur comme source froide [9].

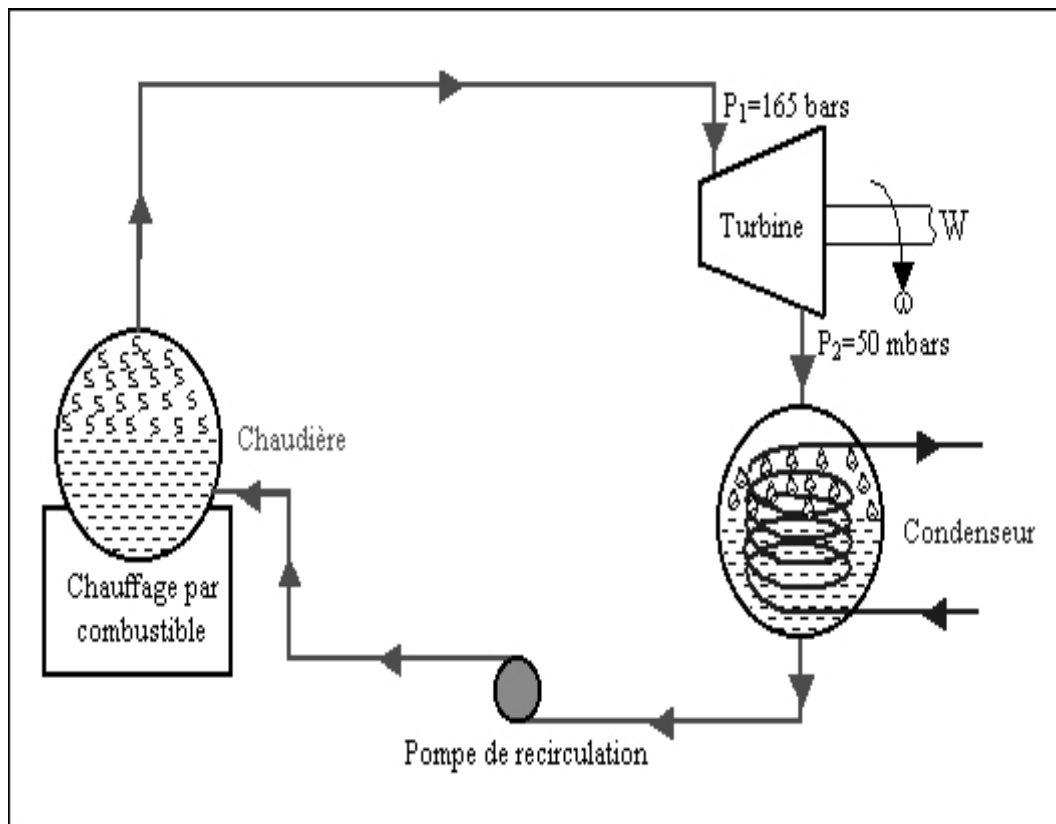


Figure II.2 : Schéma d'un cycle de Rankine [9].

La chaudière produit de la vapeur saturée qui traverse la turbine où elle se détend avant de se condenser, puis l'eau condensée retourne à la chaudière à travers la pompe alimentaire.

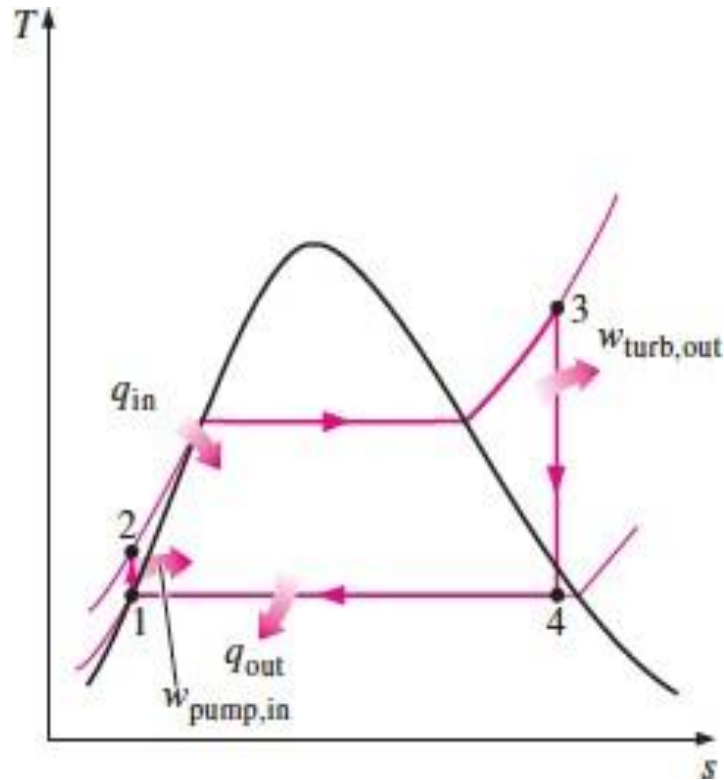


Figure II.3 : diagramme T.S de cycle de Rankine [10].

Le cycle de Rankine élémentaire se compose des quatre évolutions suivantes :

- 1→2 : une compression isentropique dans la pompe,
- 2→3 : un apport de chaleur à pression constante dans la chaudière,
- 3→4 : une détente isentropique dans la turbine,
- 4→1 : une évacuation de chaleur à pression constante dans le condenseur.

Il est à signaler que dans plusieurs documents le point 3 (l'état 3 dans la figure II.3) du cycle de Rankine élémentaire se trouve sur la courbe de rosée. Si la température  $T_3$  est supérieure à la température de saturation à la pression  $P_3$  le cycle est appelé, parfois, cycle de Rankine à surchauffe.

## Chapitre II : Cycle thermodynamique d'une centrale thermique à vapeur

---

Le bilan énergétique du cycle s'établit comme suit :

- Travail consommé par la pompe :

$$w_p = h_2 - h_1 = v (P_2 - P_1) \quad (2.1)$$

Il est à noter que  $(w_p = v (P_2 - P_1))$  résulte de l'hypothèse que le fluide est incompressible.

- La chaleur fournie par la chaudière :

$$q_H = h_3 - h_2 \quad (2.2)$$

- Le travail produit par la turbine :

$$w_t = h_4 - h_3 \quad (2.3)$$

- La chaleur évacuée (condensateur):

$$q_L = h_1 - h_4 \quad (2.4)$$

- Le travail net du cycle :

$$w = w_t + w_p = -(q_H + q_L) \quad (2.5)$$

- Le rendement thermique du cycle de Rankine :

$$\eta_{th,R} = \frac{-w}{q_H} = 1 + \frac{q_L}{q_H} \quad (2.6)$$

### II.2.3. Cycle de Hirn

Le cycle de Hirn est une variante du cycle de Rankine dans lequel la vapeur sortant de la chaudière est surchauffée à une température supérieure à la température critique. L'avantage de cette opération est de réduire la teneur de la vapeur humide en liquide qui risque d'endommager (par érosion) les aubes de la turbine [10].

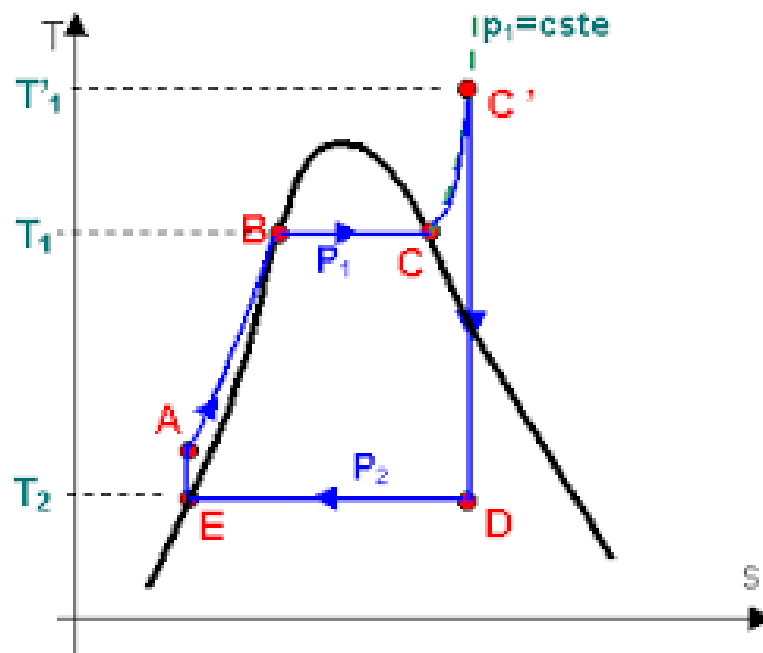


Figure II.4 : Diagramme T.S de cycle de Hirn [11].

Le bilan énergétique pour chacun des composants, le travail net ainsi que le rendement de ce cycle sont aussi calculés par les mêmes formules que le cycle de Rankine (de 2.1 à 2.6).

Il est à signaler que « l'appellation cycle de Rankine tend maintenant à être appliquée également au cycle de Hirn [12] ».

### II.2.4. L'effet des irréversibilités sur le cycle de Rankine

Le cycle réel de la turbine à vapeur diffère du cycle idéal pour plusieurs raisons, comme [10]:

- les irréversibilités dans la pompe et dans la turbine.
- les pertes de charges dans la chaudière, le condenseur et la tuyauterie entre les différents composants.

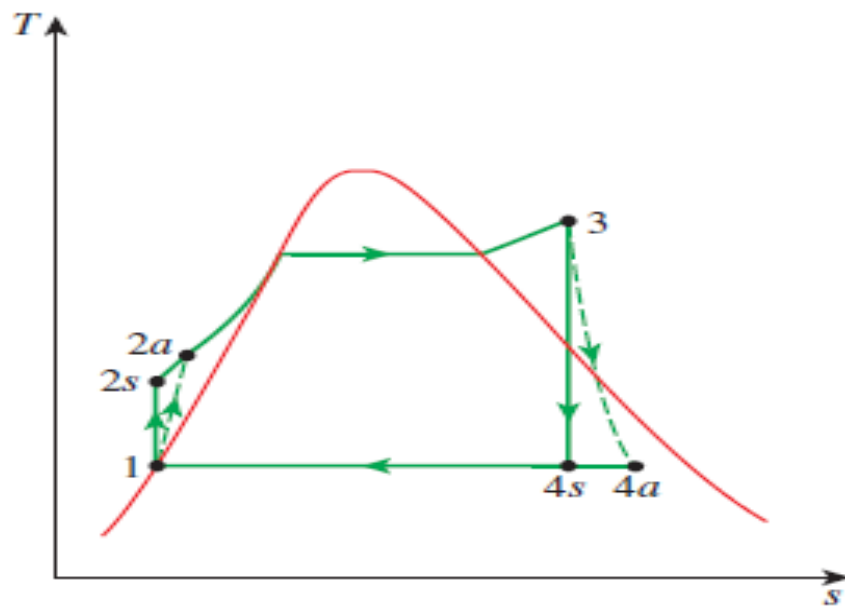


Figure II.5 : L'effet des irréversibilités sur le cycle idéal de Rankine [10].

Afin de tenir compte des irréversibilités de la pompe et de la turbine (voir figure 2.4) on définit les deux coefficients suivants [10]:

- le rendement isentropique de la pompe  $\eta_P$  :

$$\eta_P = \frac{w_{Ps}}{w_{Pa}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (2.7)$$

- le rendement isentropique de turbine  $\eta_T$  :

$$\eta_T = \frac{w_{Ta}}{w_{Ts}} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (2.8)$$

Dans les relations (2.7) et (2.8) l'indice  $a$  correspond aux états réels alors que l'indice  $s$  correspond aux états résultant d'une évolution isentropique.

### II.2.5. Cycle Rankine à resurchauffe

Dans ce cas la détente isentropique se fait dans deux étages de la turbine (transformations isentropiques 3-4 et 5-6, Figure II.6) entre lesquelles la vapeur subit une resurchauffe (transformation isobare 4-5). La resurchauffe accroît le taux de la vapeur dans la turbine et augmente de 4 à 5% le rendement thermique du cycle de Rankine [10].

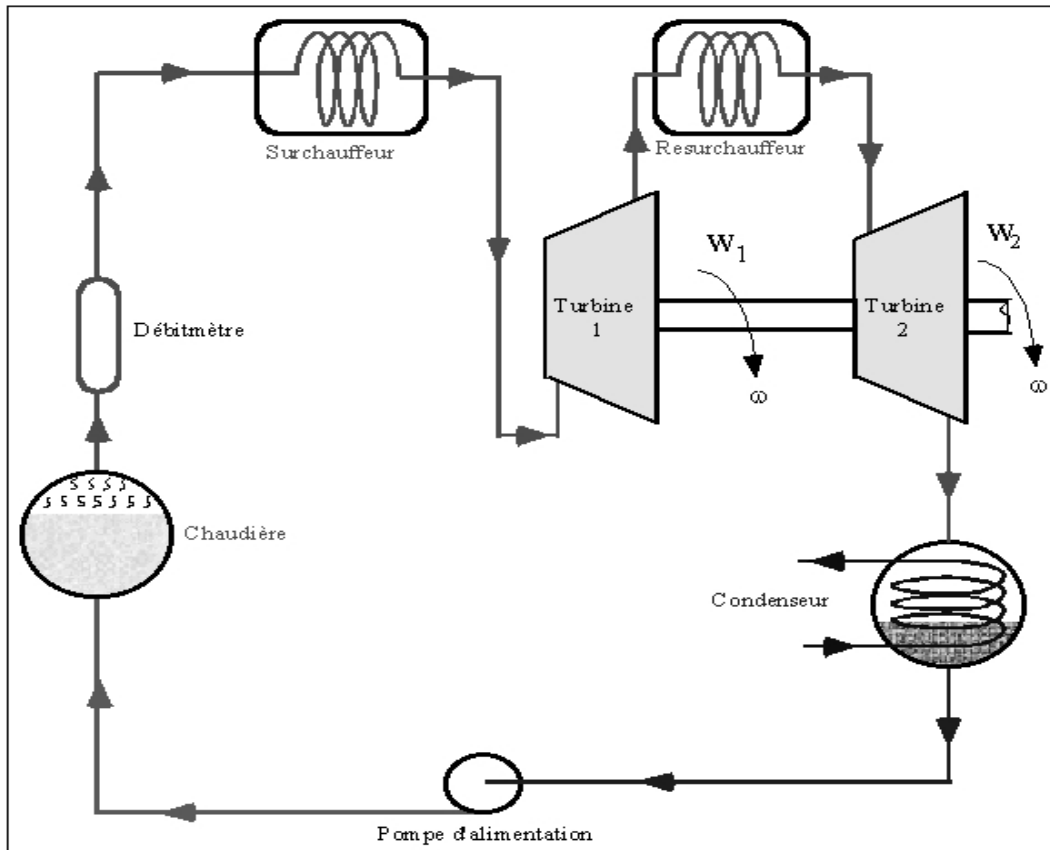


Figure II.6 : schéma de cycle à resurchauffe [9].

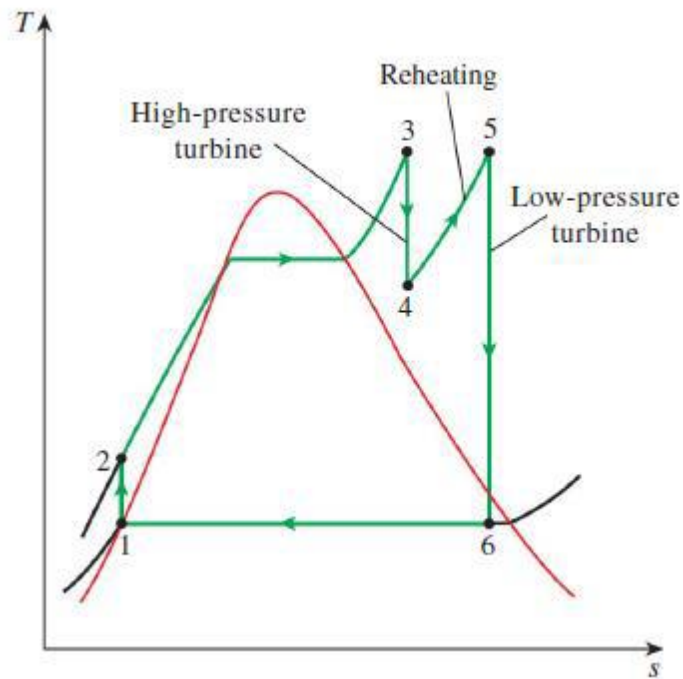


Figure II.7 : Le cycle de Rankine à resurchauffe [10].

Le bilan énergétique pour chacun des composants est comme suit :

- le travail consommé par la pompe :

$$w_p = h_2 - h_1 = v (P_2 - P_1) \quad (2.9)$$

- La quantité de chaleur de surchauffe :

$$q_{H1} = h_3 - h_2 \quad (2.10)$$

- Le travail fourni par le premier étage de la turbine (haute pression) :

$$w_{t1} = h_4 - h_3 \quad (2.11)$$

- La quantité de chaleur de Resurchauffe (dans le resurchauffeur) :

$$q_{H2} = h_5 - h_4 \quad (2.12)$$

- Le travail fourni par le deuxième étage de la turbine (basse pression) :

$$w_{t2} = h_6 - h_5 \quad (2.13)$$

- la quantité de chaleur dégagée (condensateur) :

$$q_l = h_1 - h_6 \quad (2.14)$$

- Le travail net du cycle :

$$w = w_{t1} + w_{t2} + w_p = -(q_{H1} + q_{H2} + q_L) \quad (2.15)$$

➤ le rendement thermique du cycle à resurchauffe :

$$\eta_{th,R} = \frac{-W}{q_{H1}+q_{H2}} = 1 + \frac{q_L}{q_{H1}+q_{H2}} \quad (2.16)$$

## II. 2.5. Cycle de Rankine à un soutirage

Ce cycle, afin d'augmenter le rendement du cycle de Rankine avec surchauffe (c.-à-d. de Hirn), propose d'élever la température du liquide sortant de la pompe avant de l'admettre dans la chaudière [10].

Cette technique, appelée régénération (ou soutirage), consiste à soutirer une petite partie de la vapeur de la turbine puis à détourner cette partie dans un échangeur de chaleur, appelé « régénérateur », « réchauffeur » ou « mélangeur ».

Le schéma de ce cycle est illustré par la figure II.8. Ainsi, le soutirage c'est une opération permet de prélevé une fraction de vapeur dans la turbine à une pression intermédiaire que réchauffe de l'eau à la sortie de la pompe.

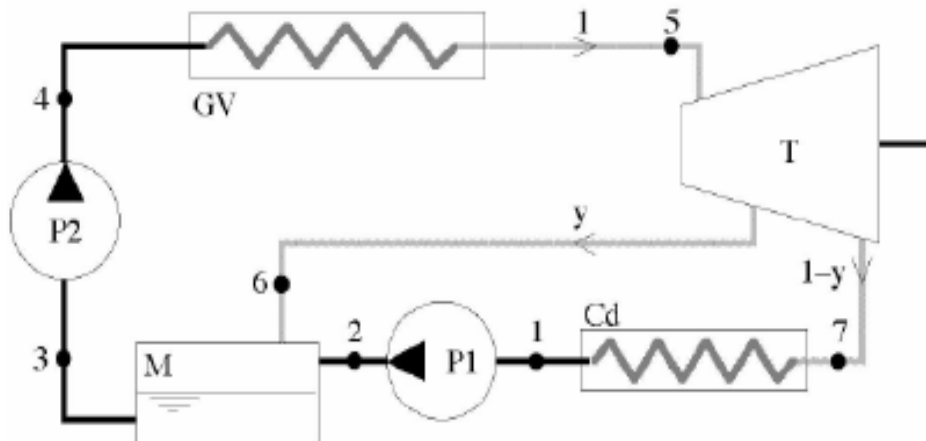


Figure II.8 : schéma de cycle de Rankine à soutirage [13].

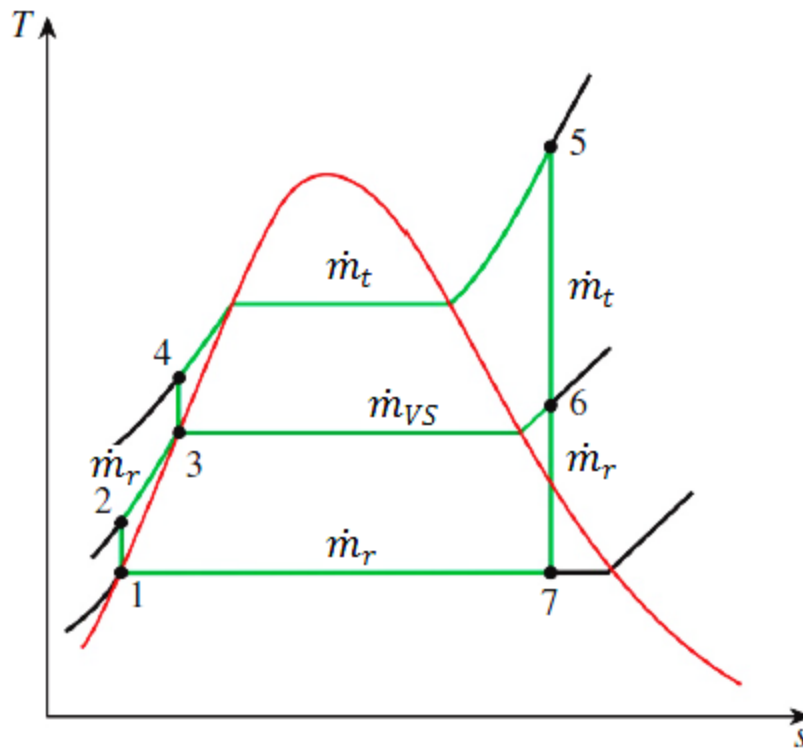


Figure II.9 : Diagramme T-s du cycle à un soutirage de vapeur [10].

La conservation du débit massique à travers un volume de contrôle renfermant les deux étages de la turbine se traduit par la relation suivante [10]:

$$\dot{m}_{vs} + \dot{m}_r = \dot{m}_t \quad (2.17)$$

Avec :

- $\dot{m}_{vs}$  : Le débit massique de la vapeur soutirée de la turbine,
- $\dot{m}_r$  : Le débit massique de la vapeur restante,
- $\dot{m}_t$  : Le débit massique total.

Si on note par  $y$  la fraction de vapeur soutirée de la turbine alors

$$y = \frac{\dot{m}_{vs}}{\dot{m}_t} \quad (2.18)$$

La fraction du flux total restant de la turbine (la vapeur qui a subi la deuxième détente 6→7) est alors égale à  $(1-y)$ :

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_t} = 1 - y \quad (2.19)$$

À l'état 3 l'eau est un liquide saturé, se traduit par la relation suivante :

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (2.20)$$

Le bilan énergétique de ce cycle est donné par l'ensemble des relations suivantes :

➤ **Pour les composants :**

➤ Pompe 1:	
	$w_{p1} = (1 - y)(h_2 - h_1) = (1 - y) v_1 (P_2 - P_1) \quad (2.21)$
➤ Pompe 2:	
	$w_{p2} = h_4 - h_3 = v_3 (P_4 - P_3) \quad (2.22)$
➤ chaudière :	
	$q_H = h_5 - h_4 \quad (2.23)$
➤ turbine :	
	$w_t = (h_6 - h_5) + (1 - y)(h_7 - h_6) \quad (2.24)$
➤ condensateur :	
	$q_L = (1 - y)(h_1 - h_7) \quad (2.25)$

➤ **Le travail net du cycle est donné par la formule suivante :**

$$w = w_t + w_{p1} + w_{p2} = -(q_H + q_L) \quad (2.26)$$

➤ **le rendement thermique du cycle à un soutirage de vapeur :**

$$\eta_{th} = \frac{-w}{q_H} = 1 + \frac{q_L}{q_H} \quad (2.27)$$

# *Chapitre III :*

*Elaboration d'un  
programme pour l'étude de  
puissance à vapeur à deux  
soutirages*

### III. Introduction

Ce troisième chapitre est consacré à la présentation des programmes élaborés pour l'étude des cycles de puissance à vapeur qui permettent d'étudier :

- Les cycles de Rankine à un soutirage et à deux soutirages.

Généralement, ces programmes ont comme les variables suivantes :

- input (variables introduites) les pressions et la température d'entrée à la turbine.
- Et comme output (variables de sortie) le rendement, le travail net et la quantité de chaleur fournie.

Tous les programmes calculent les variables thermodynamiques du fluide moteur, suivant sa forme, des tables thermodynamiques.

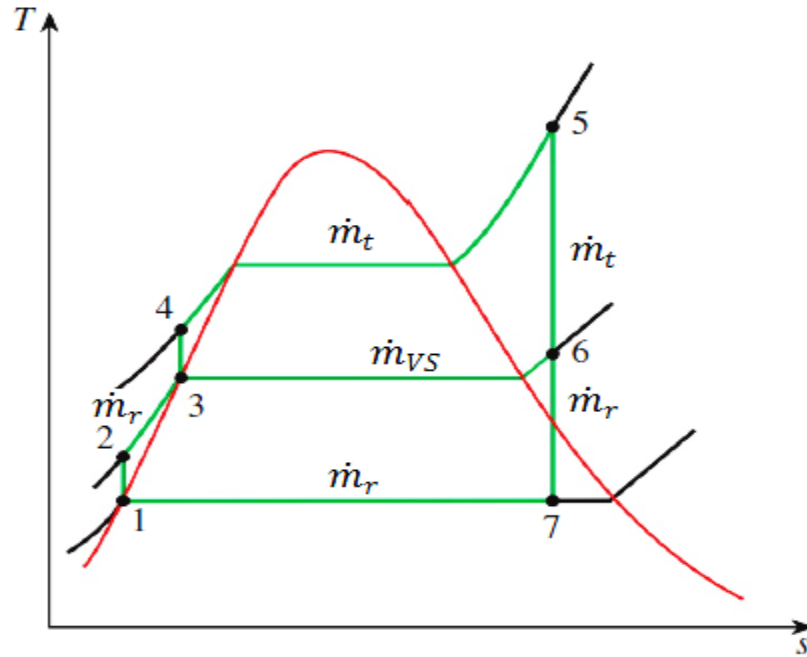
Ces tables sont stockées de la manière suivante :

- ☞ **Pour la forme liquide-vapeur** : Les tables Température et Pression utilisées pour la forme liquide-vapeur sont stockées, dans chaque programme, dans deux matrices, respectivement, 'a4' et 'a5'.
- ☞ **Pour la forme vapeur surchauffée** : ce cas est marqué par l'existence de plusieurs tables. Ainsi, pour faciliter la manipulation, une fonction, appelée 'a6', a été créée. Et dans chaque programme, en cas de besoin, on appelle cette fonction. Cette fonction a comme input la pression en *kPa* et elle renvoi la table de la vapeur surchauffée correspondante à la pression introduite.
- ☞ **Pour la forme liquide comprimée** : pour la même cause qui a poussée à créer la fonction précédente, une fonction 'a7', a été créée. La fonction renvoi la table du liquide comprimé correspondante à la pression introduite.

## III.2. Programmation de cycle de Rankine à un soutirage

### III.2.1 Utilisation

La numérotation des états de ce cycle est celle illustrée sur la figure III.1.



**Figure III.1 :** Diagramme T-s du cycle à un soutirage de vapeur [10].

Dans ce cas, on suppose qu'à l'entrée de chaque pompe l'eau se trouve sous forme de liquide saturé.

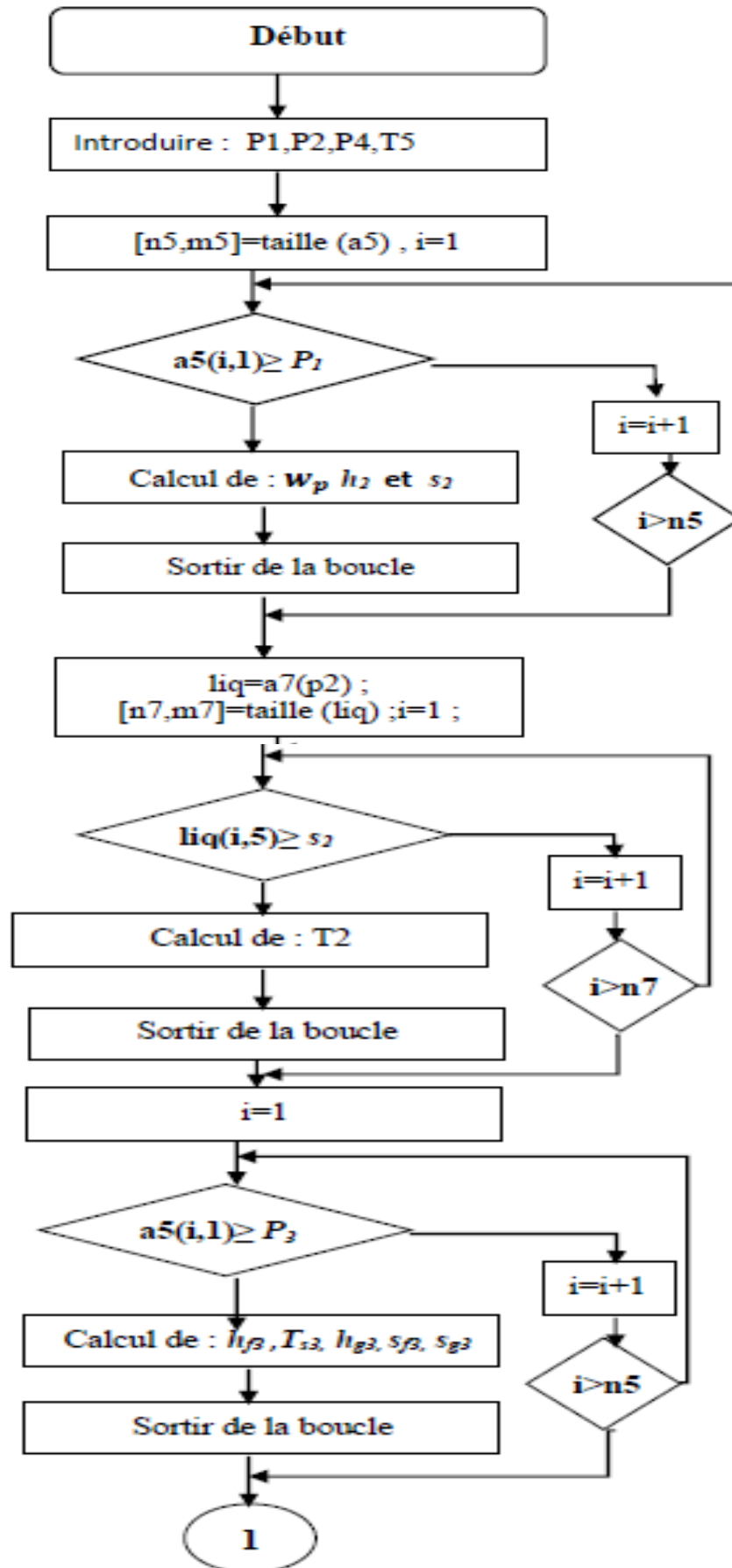
Il convient de signaler, que pour le soutirage, deux types de réchauffeur et un échangeur de chaleur sont utilisés :

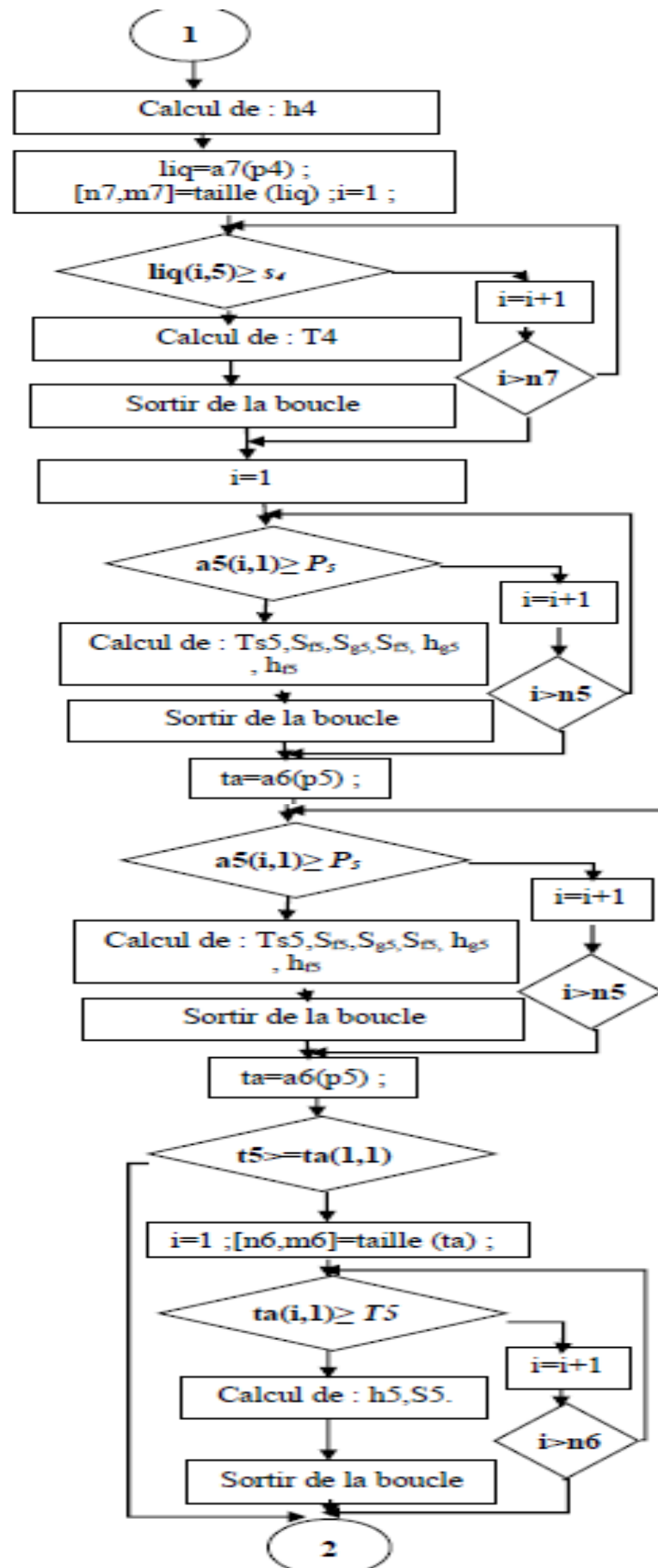
- 1- **Le réchauffeur à mélange** (en anglais : *Open Feedwater Heater*) : la vapeur soutirée est mélangée à de l'eau d'alimentation à la même pression.
- 2- **Le réchauffeur à séparation** (en anglais : *Closed Feedwater Heater*) : la vapeur soutirée et l'eau d'alimentation ne se mélangent pas.
- 3- **Et un échange de chaleur** s'établit entre les deux fluides à des pressions différentes.

Dans ce travail, seul le réchauffeur à mélange est étudié.

### III.2.2. L'organigramme du programme :

L'organigramme du programme d'un soutirage est donné par la figure III.2.





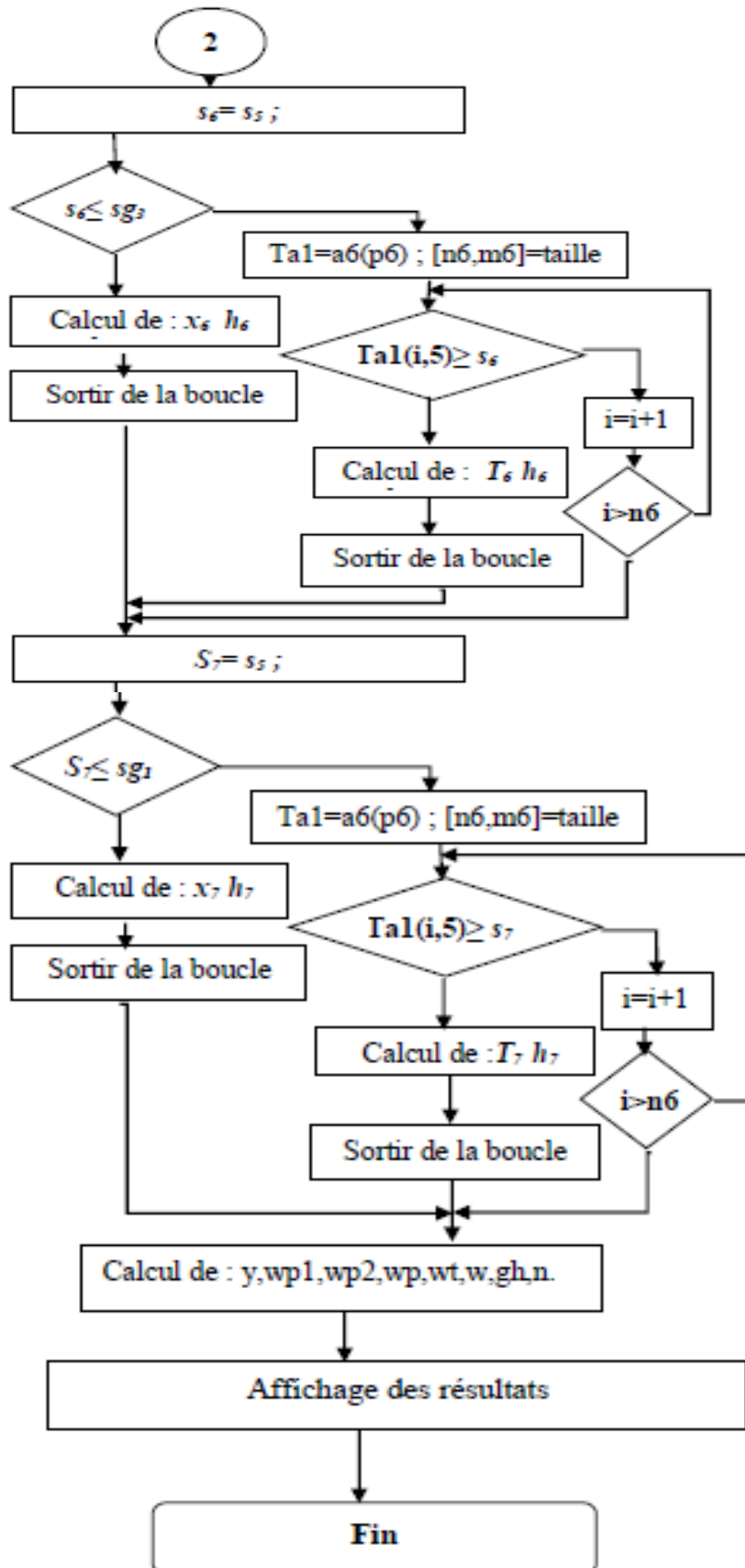


Figure III.2 : Organigramme du calcul pour le cycle à un soutirage

### III.2.3. Application numérique et programmation par MATLAB:

On considère une application sur une turbine à vapeur fonctionnant selon les caractéristiques suivantes :

- La vapeur d'eau est admise dans la turbine à 5 MPa et à 600°C et elle est condensée dans le condenseur à 10 kPa.
- Une partie de la vapeur est soutirée à 0.2MPa pour être détournée vers le réchauffeur.
- On cherche à déterminer :
  - 1) la fraction de la vapeur soutirée de la turbine
  - 2) le rendement thermique du cycle. » [10]

☞ **Pour le programme voir l'annexe 1 :**

- **Résultat numérique :**

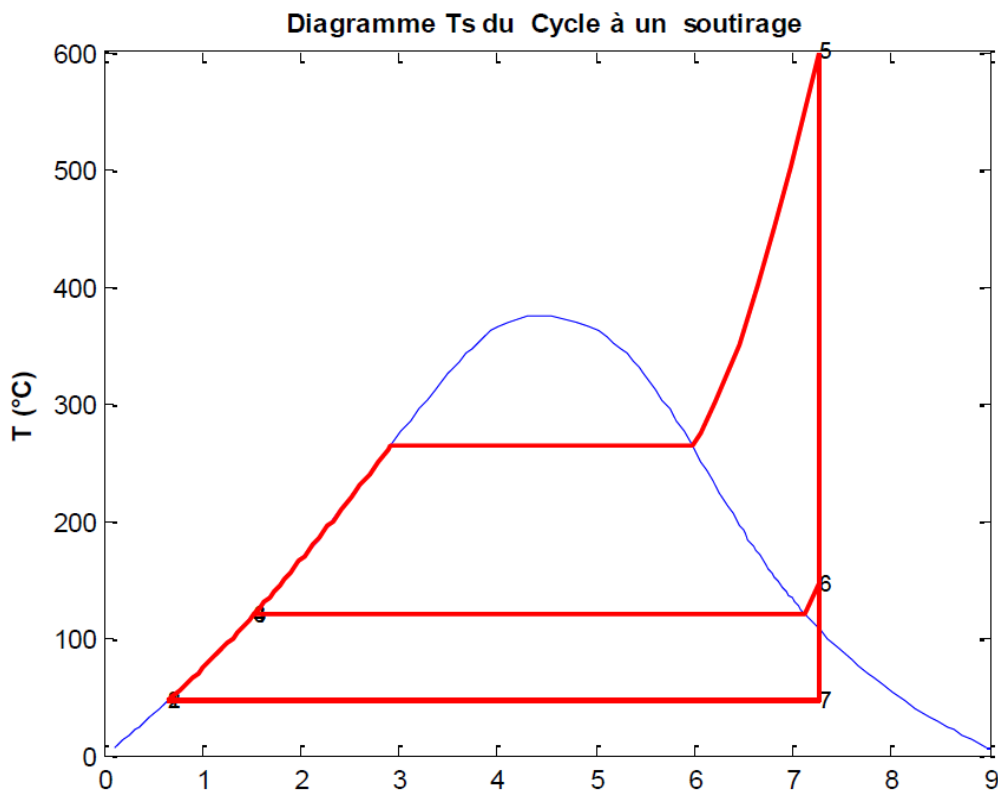


Figure III.3 : Diagramme T-s de l'application

Désignation	Résultats numériques	Unités
<b>h1</b>	191.810	KJ/Kg
<b>h2</b>	192.002	KJ/Kg
<b>h3</b>	504.710	KJ/Kg
<b>h4</b>	509.803	KJ/Kg
<b>h5</b>	3666.900	KJ/Kg
<b>h6</b>	2760.740	KJ/Kg
<b>h7</b>	2300.566	KJ/Kg
<b>T1</b>	45.810	°C
<b>T2</b>	45.818	°C
<b>T3</b>	120.210	°C
<b>T4</b>	120.617	°C
<b>T5</b>	600.000	°C
<b>T6</b>	146.034	°C
<b>T7</b>	45.810	°C
<b>Le volume massique</b>	0.001061	m <sup>3</sup> /Kg
<b>La fraction soutirée</b>	0.122	/
<b>Le travail massique consommé par la première pompe</b>	0.169	/
<b>Le travail massique consommé par la deuxième pompe</b>	5.093	KJ/Kg
<b>Le travail massique consommé par les deux pompes</b>	5.261	KJ/Kg
<b>Le travail massique fourni par les la turbine</b>	1310.314	KJ/Kg
<b>Le travail massique net</b>	1305.053	KJ/Kg
<b>La quantité de chaleur reçue</b>	3157.097	KJ/Kg
<b>Le rendement de la TAV</b>	41.337	/

**Tableau III.1 : Résultats numérique d'exécution du programme**

### III.3. Programmation de cycle de Rankine à deux soutirages

#### III.3.1 Utilisation

En utilisant le cycle de Rankine à deux soutirages afin d'améliorer le rendement thermique, ainsi le cycle à soutirage permet, également, d'une part de dégazer l'eau, évitant ainsi la corrosion de la chaudière, et de l'autre part de contrôler les débits volumiques élevés dans les derniers étages de la turbine [10].

L'amélioration est d'autant plus sensible que le nombre de soutirages est plus élevé. Pour les installations motrices à vapeur de moyenne puissance (de l'ordre de 50 MW) le soutirage est limité à un ou deux soutirages.

Pour mettre en évidence l'effet de doubler le nombre de soutirages sur le bilan énergétique, nous avons élaboré l'organigramme Figure III.6

La numérotation des états de cycle de deux soutirages est expliquée par la figure III.5.

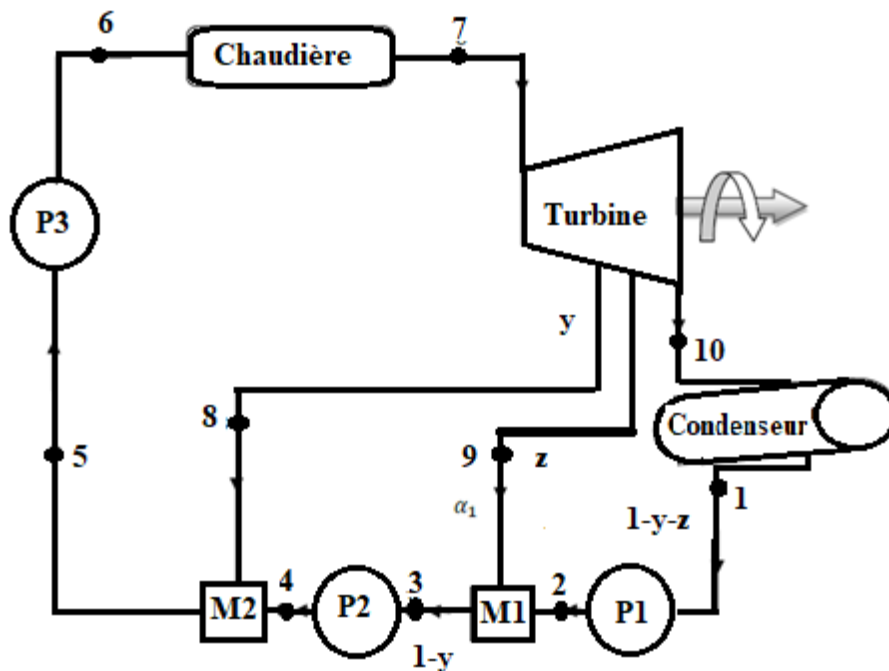


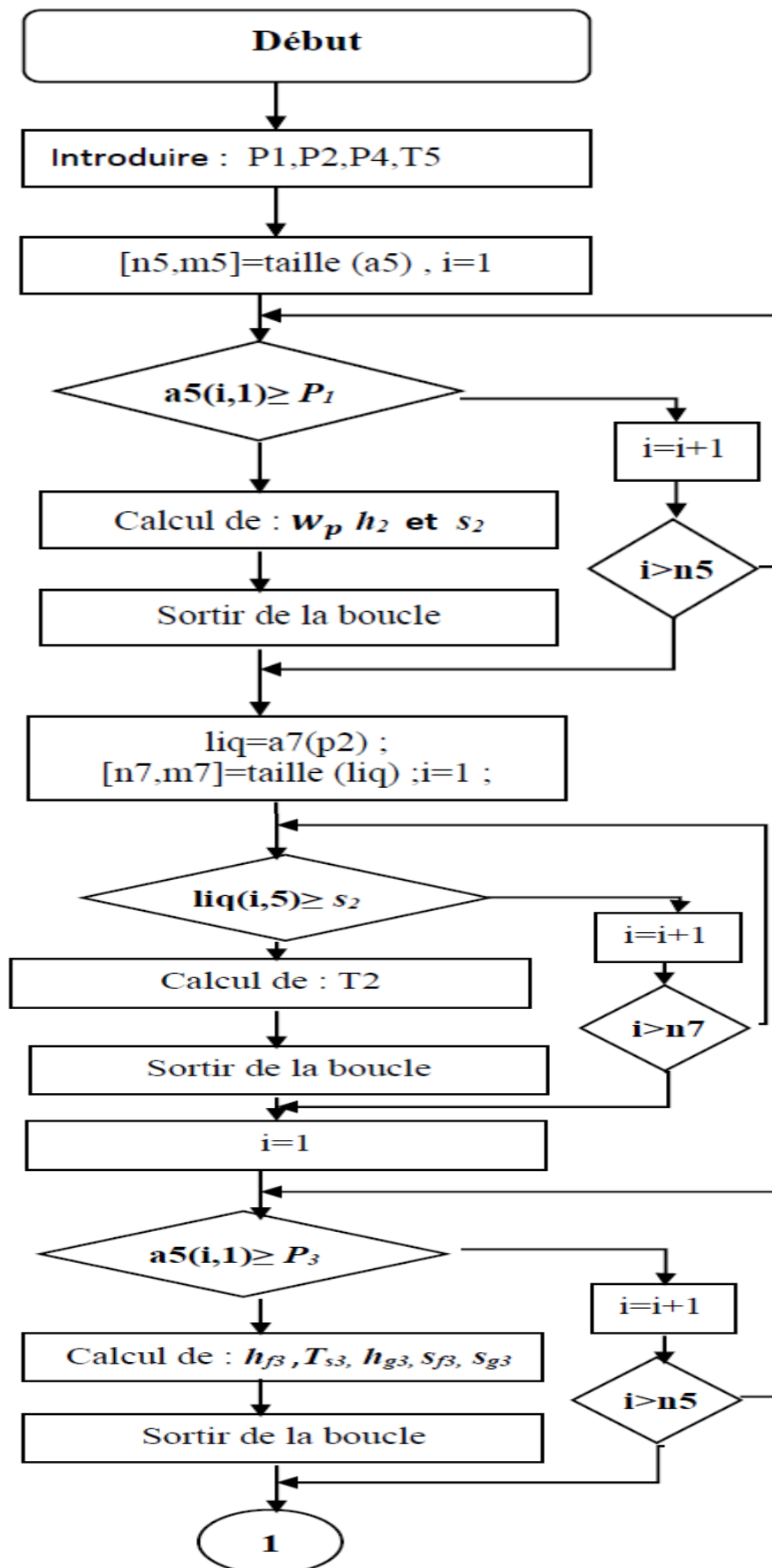
Figure III.4 : Schéma du cycle de Rankine à deux soutirages.

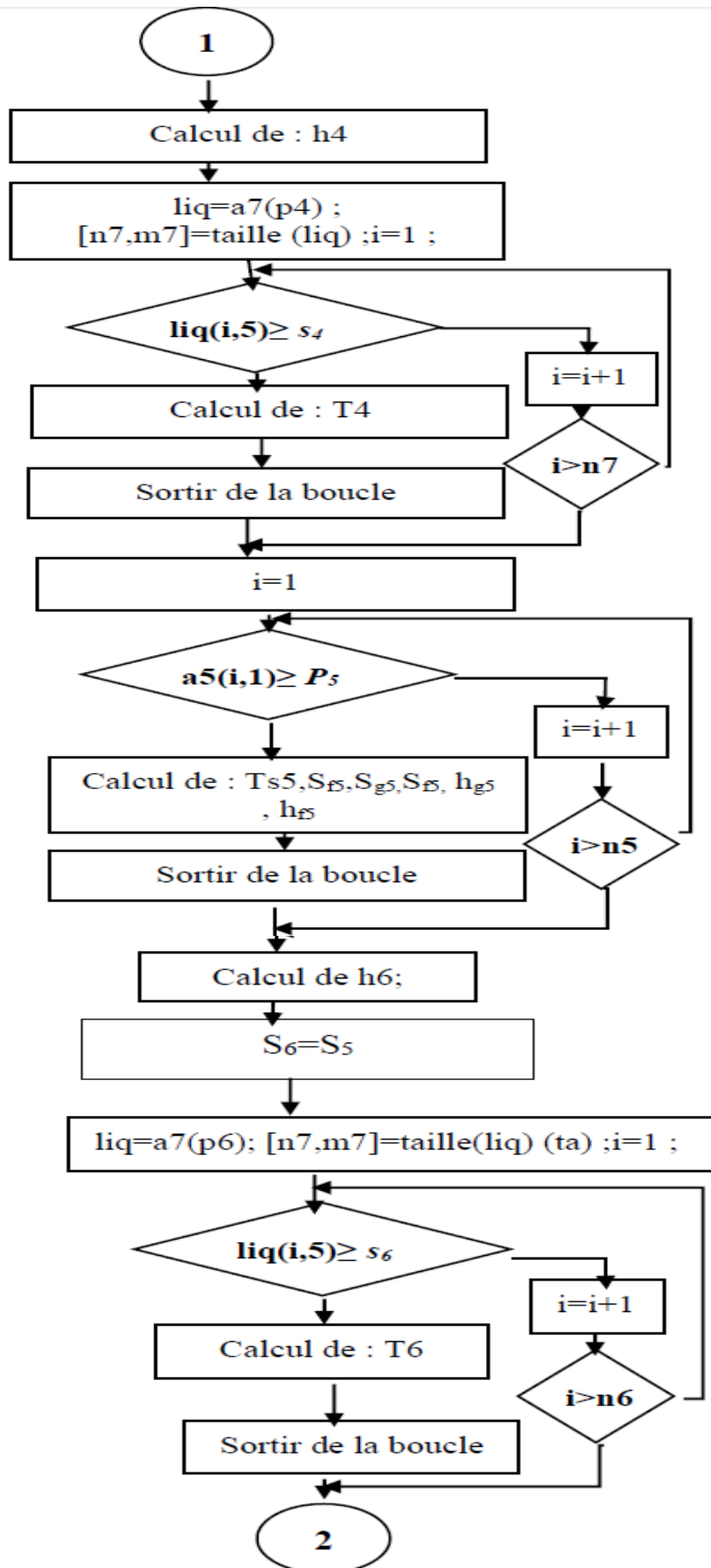
Dans la figure III.5, on note par **P** la pompe et par **M** le mélangeur.

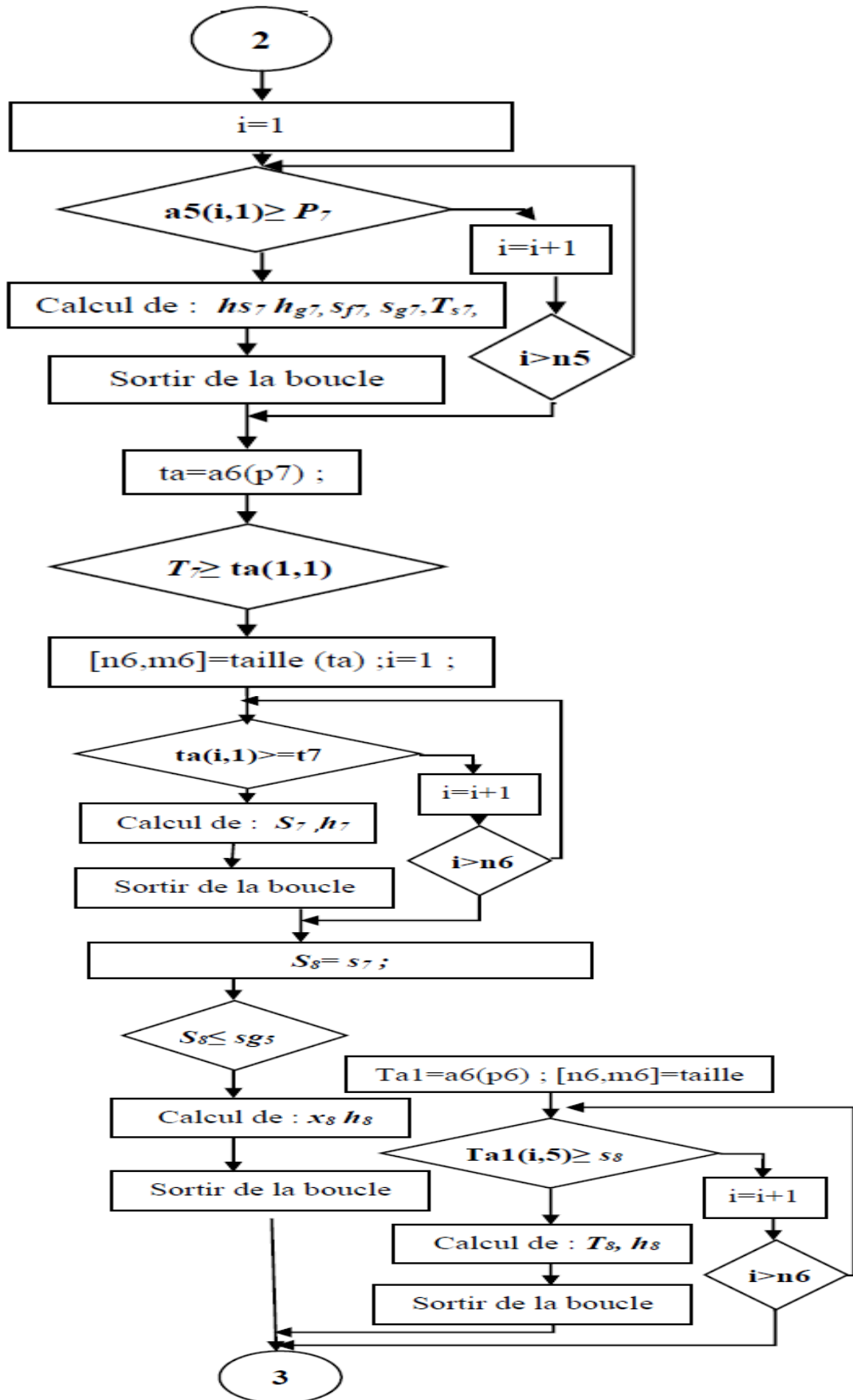
Noter ainsi ;  $y$  est la première fraction de vapeur soutirée de la turbine et  $z$  est la deuxième fraction de vapeur soutirée.

On suppose, également à l'entrée de chaque pompe l'eau se trouve sous la forme de liquide saturé

#### III.3.2. L'organigramme du programme







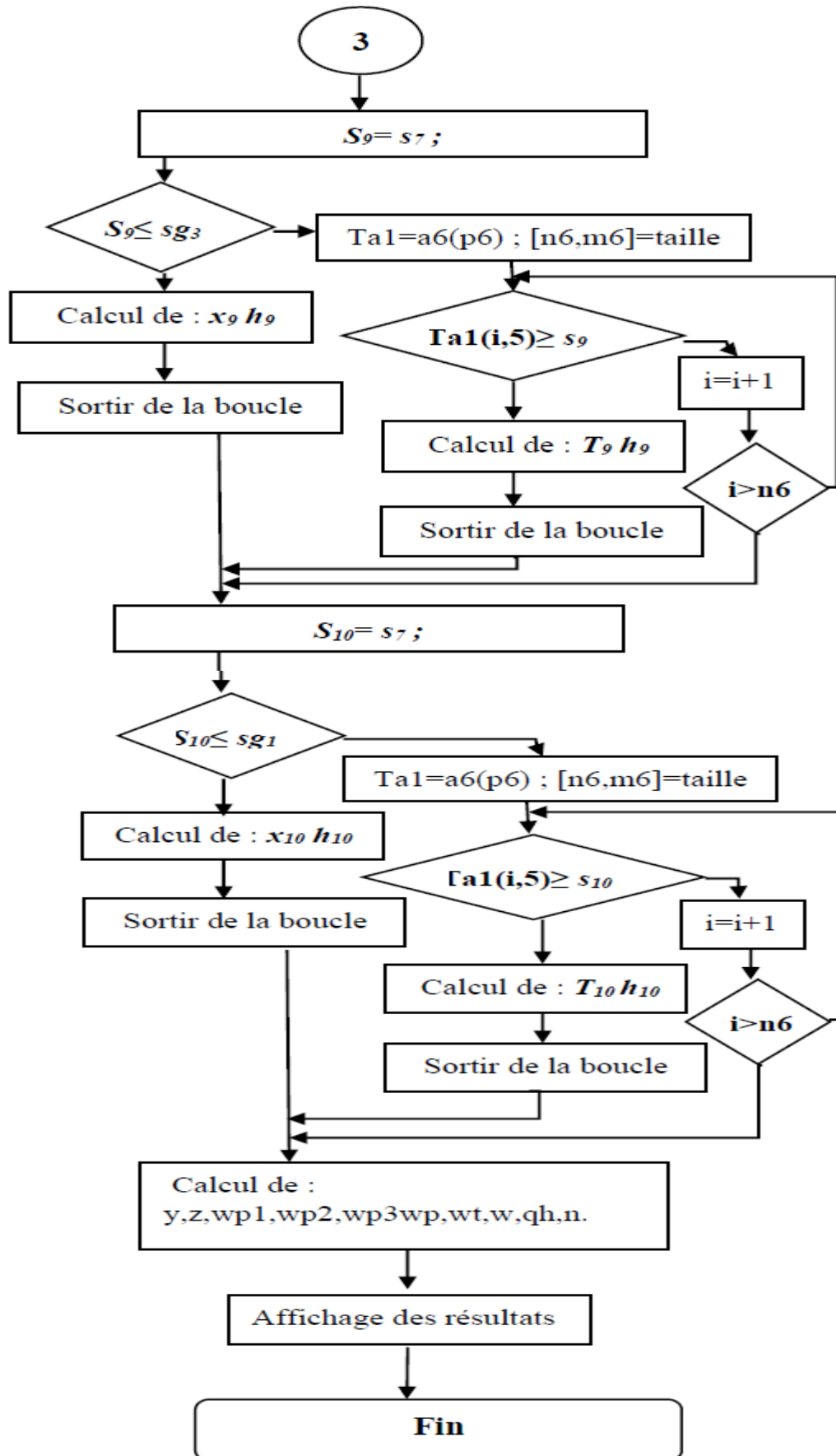


Figure III.5 : Organigramme de cycle à deux soutirages.

### III.3.3. Application numérique et programmation par MATLAB:

On considère une application sur une turbine à vapeur fonctionnant selon les caractéristiques suivantes :

- La vapeur d'eau est admise dans la turbine à 5 MPa et à 600°C et elle est condensée dans le condenseur à 10 kPa.
- Deux soutirages : le premier à une pression de 1MPa et le deuxième à 0.2MPa
- On cherche à déterminer :
  - 1) la fraction de la vapeur soutirée de la turbine
  - 2) le rendement thermique du cycle. » [10]

☞ **Pour le programme voir l'annexe 2 :**

- **Résultats numérique :**

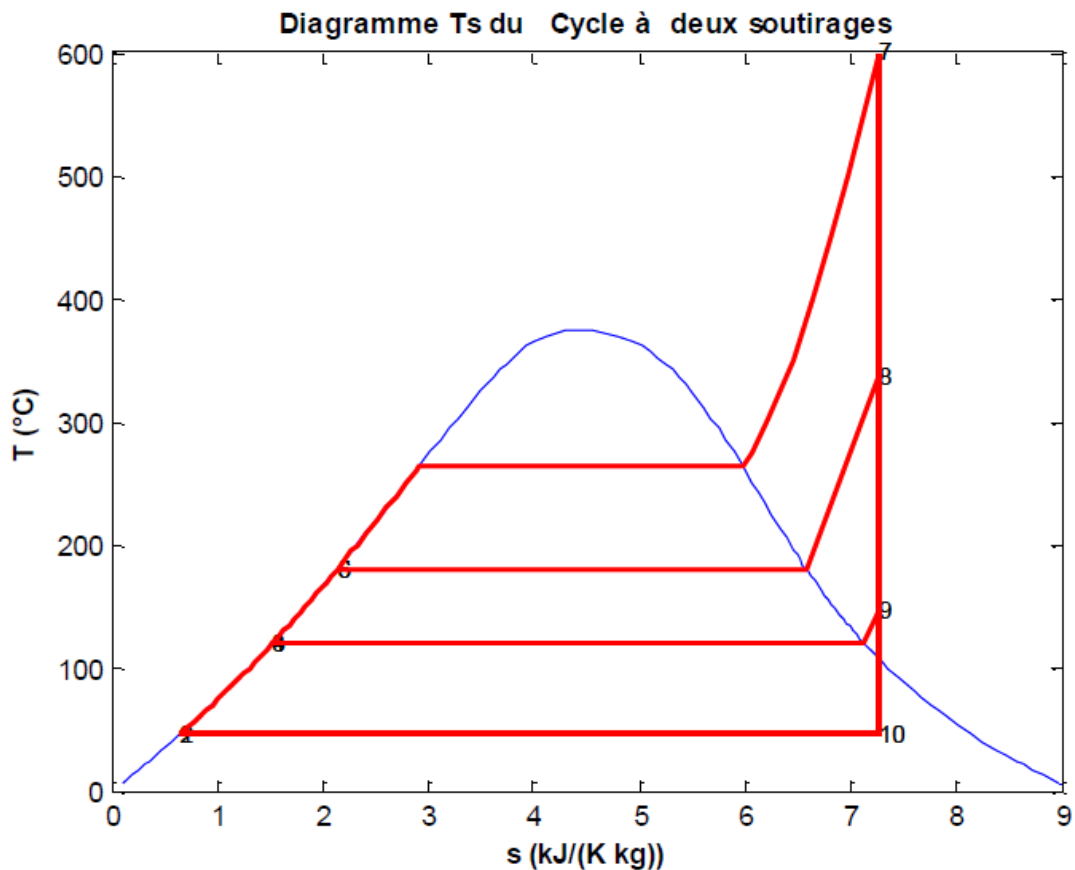


Figure III.6 : Diagramme T-s du l'application à deux soutirage.

Désignation	Résultats numériques	Unités
<b>h1</b>	191.810	KJ/Kg
<b>h2</b>	192.002	KJ/Kg
<b>h3</b>	504.710	KJ/Kg
<b>h4</b>	505.559	KJ/Kg
<b>h5</b>	762.510	KJ/Kg
<b>h6</b>	767.018	KJ/Kg
<b>h7</b>	3666.900	KJ/Kg
<b>h8</b>	3132.850	°C
<b>h9</b>	2760.740	°C
<b>h10</b>	2300.566	°C
<b>T1</b>	120.617	°C
<b>T2</b>	600.000	°C
<b>T3</b>	146.034	°C
<b>T4</b>	45.810	°C
<b>T5</b>	179.880	°C
<b>T6</b>	180.445	°C
<b>T7</b>	600.000	°C
<b>T8</b>	338.110	°C
<b>T9</b>	146.034	°C
<b>T10</b>	45.810	°C
<b>Le volume massique V<sub>3</sub></b>	0.001061	m <sup>3</sup> /Kg
<b>Le volume massique V<sub>5</sub></b>	0.001127	m <sup>3</sup> /Kg
<b>La fraction soutirée lors du premier soutirage (y)</b>	0.098	/
<b>La fraction soutirée lors du deuxième soutirage (z)</b>	0.110	/
<b>Le travail massique consommé par la première pompe</b>	0.152	KJ/Kg
<b>Le travail massique consommé par la deuxième pompe</b>	0.766	KJ/Kg
<b>Le travail massique consommé les trois pompes</b>	5.426	KJ/Kg
<b>Le travail massique fourni par la turbine</b>	-1234.395	KJ/Kg
<b>Le travail massique net</b>	-1228.969	KJ/Kg
<b>La quantité de chaleur reçue</b>	2899.882	KJ/Kg
<b>Le rendement de la TAV</b>	42.380	/

Tableau III.2 : Résultats numérique d'exécution du programme à deux soutirages

## **Conclusion générale :**

Les turbines à vapeur occupent une place incontournable dans les systèmes de production de l'électricité. En effet, dans notre pays, les turbines à gaz et à vapeur représentent environ 97% des moyens utilisés pour satisfaire nos besoins énergétiques [14]. Ainsi, l'étudiant en énergétiques doit maîtriser le calcul des bilans énergétiques des cycles des machines thermiques motrices à vapeur. Le travail présenté, dans ce mémoire, est une contribution à l'étude de ces cycles.

Afin de faciliter les calculs et de réaliser une étude paramétriques, nous avons développé un programme écrit en MATLAB qui permet le diagramme entropique du cycle à deux soutirage.

On peut ainsi utiliser ce programme pour calculer les gains ainsi que les chutes d'enthalpie pour les différents nombre de soutirages et les propriétés énergétiques (pression, température, enthalpie, etc.) correspondantes aux soutirages effectués.

Tous les programmes élaborés offrent la possibilité de la :

- la fusion de tous les programmes dans un seul programme,
- la réalisation d'une interface graphique.

En perspective, il est intéressant de faire une étude d'optimisation des paramètres de soutirages de la vapeur qui sont parmi les éléments les plus influents et les plus déterminants pour l'amélioration des rendements.

# **BIBLIOGRAPHIE**

# Bibliographie

- [01] Yacine AGUENI et Fayçal DRAIFI. Le rôle des soutirages turbine haute et basse pression dans le rendement du cycle de la centrale de CAP-DJINAT, *Projet de fin d'études, Univ. M'hamed BOUGARA, Boumerdes, 2009.*
- [02] André LALLEMAND. Production d'énergie électrique par centrales thermiques. *Techniques de l'Ingénieur, 2009.*
- [03] André LALLEMAND. Convertisseurs thermomécaniques - Cycles moteurs à vapeur et combinés. Cogénération, *Techniques de l'Ingénieur, 2009.*
- [04] André LALLEMAND. Thermodynamique appliquée - Premier principe. Énergie. Enthalpie, *Techniques de l'Ingénieur, 2009.*
- [05] ANSALDO. Consommation spécifique de chaudière. *Centrale de Mers-El-Hadjadj, Oran, R-010, 1984.*
- [06] Fouad BOUZAR et Mohamed ATTIG. Etude énergétique d'une centrale thermique à turbine à vapeur. *mémoire de fin d'études, Univ. M'hamed BOUGARA, Boumerdes, 2003.*
- [07] David LINDSLEY. Power-plant Control and Instrumentation - The Control of Boilers and HRSG Systems. *The institution of ElectricalEngineers, London, 2005.*
- [08] Circuit d'eau et de vapeur. *Archives de constructeur de la central CAP-DJINET, Boumerdes, KWU, Service de formation, numéro d'enregistrement 5512.*
- [09] La chaudière. *Archives de constructeur de la centrale CAP-DJINET, Boumerdes, KWU, Service de formation, numéro d'enregistrement 5505.*
- [10] Turbine à vapeur. *Archives de constructeur de la centrale CAP-DJINET, Boumerdes, KWU, Service de formation, numéro d'enregistrement 5520.*
- [11] Condenseur. *Archives de constructeur de la centrale CAP-DJINET, Boumerdes, KWU, Service de formation, numéro d'enregistrement 5522.*
- [12] Notions élémentaires. *Archive de constructeur de la central CAP-DJINET, Boumerdes, KWU, Service de formation, numéro d'enregistrement 5519.*

