

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Sciences de L'Ingénieur  
Département Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Génie Mécanique  
**Spécialité**  
*Energétique*

*Hybridation de la centrale de Cap-Djinet  
avec un cycle à gaz*

Présenté par :

MALOUADJMI Nouara

TOUATI Maria

promoteur :

BOUSHAKI Tarik

Encadreur :

CHERIFI Saïd

**Promotion 2018- 2019**

## Remerciement

*En premier lieu nous tenons à remercier dieu, notre créateur qui nous offre la vie, et nous a donné la force pour accomplir ce travail.*

*Notre sincère remerciement va à notre promoteur **Mr T. BOUSHAKI** pour son suivi et ses conseils pendant toute la période du projet.*

*Nos plus vifs remerciements vont à notre encadreur **Mr S. CHERIFI** qui nous a suivi durant les différentes phases de notre travail, sans oublier **Mr Y. BATROUNI** pour son aide fortement appréciée au sein de la centrale de Ras-Djinet.*

*Une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants du département de Génie mécanique, qui ont contribué à formation pendant tout la durée de nos études, afin d'acquérir ce modeste savoir.*

*Nous remercions les membres de jury qui ont bien voulu examiner notre travail.*

*En fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



**MALOUADJMI Nouara, TOUATI Maria**

## *Dédicace*

*Je décide ce modeste travail :*

*Aux plus chers de ma vie, la source et la raison de mon existence : **Mes chers parents** que dieu les protège.*

*A toute ma famille*

*A ma sœur (Maroua) et Mes frères (Houssein et Mohamed)*

*A mes cousines et mes cousins.*

*A mon binôme Maria et sa famille*

*A mes très chères amies*

*A tous ceux qui me connaissent*

*A tous ceux et à toutes celles qui m'aiment et que j'aime*

*Nouara*

## **Sommaire**

## Sommaire

**Nomenclatureur**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**

### **Chapitre I : présentation de la centrale de Ras-Djinet**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                            | 1  |
| I.1.Historique.....                                                          | 1  |
| I.2.Rôle de la centrale thermique.....                                       | 3  |
| I.3.Plan de masse.....                                                       | 3  |
| I.4.Plan de situation.....                                                   | 6  |
| I.5.Organigramme.....                                                        | 7  |
| I.6.Les constitutions de la centrale .....                                   | 8  |
| I.6.1 Stations .....                                                         | 8  |
| I.6.2.les circuits.....                                                      | 9  |
| I.7.Les principaux organes de la centrale .....                              | 13 |
| I.8.Les caractéristiques technique de principaux organes de la centrale..... | 13 |
| I.9.Fonctionnement d'une tranche de production.....                          | 22 |
| Conclusion.....                                                              | 24 |

### **Chapitre II: Généralité sur les cycles (à vapeur, à gaz, combiné)**

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                              | 25 |
| II.1.Turbine à vapeur .....                                    | 25 |
| II.1.1.Définition .....                                        | 25 |
| II.1.2.Histoire de la turbine à vapeur .....                   | 25 |
| II.1.3.Principe de fonctionnement de la turbine à vapeur ..... | 26 |
| II.1.4.Applications des turbines à vapeur .....                | 26 |
| II.1.5.Classification des turbines à vapeur.....               | 27 |
| II.1.6 .Cycle de Rankine .....                                 | 29 |
| II.1.7.Cycle de Hirn.....                                      | 31 |
| II.1.8.Cycle de Hirn avec resurchauffe .....                   | 32 |
| II.1.9. Cycle supercritique .....                              | 33 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| II.2.Turbine à gaz .....                                  | 34 |
| II.2.1.Définition .....                                   | 34 |
| II.2.2.Historique.....                                    | 35 |
| II.2.4.Principe de fonctionnement .....                   | 36 |
| II.2.5.Classification des turbines à gaz .....            | 37 |
| II.2.6.Les types de turbine à gaz.....                    | 37 |
| II.2.7.Cycles thermodynamique.....                        | 38 |
| II.3.Cycle combiné .....                                  | 40 |
| II.3.1.Introduction.....                                  | 40 |
| II.3.2.Définition.....                                    | 40 |
| II.3.3.historique.....                                    | 41 |
| II.3.4.Principe de fonctionnement .....                   | 42 |
| II.3.6.Les éléments de base de cycle combiné .....        | 44 |
| II.3.7.La chaudière de récupération.....                  | 44 |
| II.3.8.Rôle de la chaudière de récupération .....         | 45 |
| II.3.9.Classification des chaudières de récupération..... | 46 |
| II.3.10. Diagramme entropique d'un cycle combiné.....     | 53 |
| II.3.12.Caractéristique d'un cycle combiné.....           | 53 |
| II.3.14..Les avantages et les inconvénients.....          | 53 |
| Conclusion.....                                           | 54 |

### **Chapitre III: Etude énergétique de l'installation actuelle et transformé**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction .....                                                       | 55 |
| III.1.Le but de la transformation choisis .....                          | 55 |
| III.2.Choix de la turbine à gaz.....                                     | 55 |
| III.3.Description de la Turbine à gaz SGT5-4000F. ....                   | 55 |
| III.4.La chaudière de récupération.....                                  | 58 |
| III.5.Calcul de débit d'eau pénétrant la chaudière de récupération ..... | 59 |
| III.6.Étude énergétique de la centrale de Ras-Djinet.....                | 61 |
| III.6.1.Le rendement de cycle.....                                       | 61 |
| III.6.2.Le premier principe de la thermodynamique.....                   | 62 |
| III.6.3.Les différentes stations du circuit thermique .....              | 63 |
| III.6.4. Soutirages .....                                                | 64 |
| III.6.5.Les données de L'installation.....                               | 67 |
| III.6.6.Calcul des travaux .....                                         | 69 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.6.7.Calcul de la quantité de chaleur fourni par la chaudière .....                            | 72 |
| III.6.8.Evaluation du rendement thermique du cycle .....                                          | 72 |
| III.6.9.Calcul de travail de la turbine, pompe alimentaire et d'extraction à chaque charge .....  | 73 |
| III.6.10.Calcul de la quantité de chaleur fournie par la chaudière à chaque charge .....          | 76 |
| III.6.11.Calcul de rendement du cycle à chaque charge .....                                       | 76 |
| III.6.12.Calcul de rendement global de la centrale de Cap Djinet.....                             | 77 |
| III.6.13. Calcul de rendement global du cycla à vapeur liée au cycle à gaz.....                   | 78 |
| III.7.Calcul de rendement d'un seul groupe lié à la nouvelle installation .....                   | 79 |
| III.7.1.Calcul de la puissance introduite en présence de GVR pour un groupe à chaque charge ..... | 80 |
| III.7.2.Influence de la nouvelle installation.....                                                | 82 |
| III.7.3.La distribution de la vapeur dans les différentes charges .....                           | 83 |
| III.7.4 .La distribution de la vapeur lors d'un arrête.....                                       | 84 |
| III.7.5.Tableau récapitulatif des résultats .....                                                 | 86 |
| III.7.6.La puissance totale de la nouvelle installation .....                                     | 86 |
| Conclusion.....                                                                                   | 87 |

## **Chapitre IV : Etude économique**

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction. ....                                                                                         | 88 |
| IV.1.Comparaison des consommations spécifiques de l'installation actuelle et la nouvelle installation..... | 89 |
| IV.2.Les composantes de l'investissement.....                                                              | 89 |
| IV.2.1.Le coût « I » .....                                                                                 | 89 |
| IV.2.2.Les dépenses d'exploitation .....                                                                   | 90 |
| IV.2.3.Les recettes .....                                                                                  | 90 |
| IV.2.4.L a durée de vie de la nouvelle l'installation.....                                                 | 91 |
| IV.2.5.Le Cash-Flow .....                                                                                  | 91 |
| IV.2.6.La valeur résiduelle .....                                                                          | 91 |
| IV.2.7.Le taux d'actualisation .....                                                                       | 91 |
| IV.3.Etude de la rentabilité du projet .....                                                               | 92 |
| IV.3.1.Calcul du bénéfice actualisé ou valeur actuelle nette par la méthode .....                          | 92 |
| IV.3.2.Le taux de rentabilité interne TRI .....                                                            | 93 |
| IV.3.3.Le délai de récupération DR ou temps de retour simple TRS.....                                      | 94 |
| Conclusion.....                                                                                            | 95 |

## **Conclusion générale**

## Chapitre I

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : la centrale thermique de Ras Djinet.....                                        | 1  |
| Figure I.2 : Energie produit de la centrale thermique.....                                   | 3  |
| Figure I.3 : Plan de masse de la centrale.....                                               | 4  |
| Figure I 4 : Plan de situation de la centrale.....                                           | 6  |
| Figure I 5 : Organigramme de la centrale.....                                                | 7  |
| Figure I 6 : principales transformations d'énergie.....                                      | 11 |
| Figure I 7: Générateur de vapeur.....                                                        | 14 |
| Figure I 8 : une turbine.....                                                                | 17 |
| Figure I 9 : Le Condenseur.....                                                              | 18 |
| Figure I 10: La bêche alimentaire.....                                                       | 19 |
| Figure I 11 : principaux composants et circuits d'une tranche thermique de la centrale ..... | 23 |

## Chapitre II

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.1 : turbine à vapeur .....                                                        | 25 |
| Figure II.2: Représentation schématique d'une installation motrice à vapeur.....            | 27 |
| Figure II.3 : schéma de principe d'un cycle de Rankine.....                                 | 29 |
| Figure II.4:diagramme (T-S) de cycle de Rankine.....                                        | 30 |
| Figure II.5: installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn..... | 31 |
| Figure II.6 : Cycle de Hirn.....                                                            | 31 |
| Figure II.7: Schéma d'une IMV d'un cycle de Hirn avec surchauffe.....                       | 32 |
| Figure II.8 : Cycle de Hirn à resurchauffe.....                                             | 32 |
| Figure II.9: IMV à cycle supercritique à deux resurchauffes.....                            | 33 |
| Figure II.10 schéma d'une turbine à gaz.....                                                | 34 |
| Figure II.11 principe de fonctionnement d'une turbine à gaz.....                            | 35 |
| Figure II.12 Diagramme T-S de cycle Brayton idéal.....                                      | 38 |
| Figure II.13 : Diagramme T-S de cycle Brayton réel.....                                     | 39 |
| Figure II.14: Schéma d'un cycle combiné.....                                                | 40 |



## Liste des figures

---

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.15: Principe de fonctionnement d'un cycle combiné .....           | 42 |
| Figure II.16: les éléments de base de cycle combiné.....                    | 43 |
| Figure II.17: Chaudière à circulation naturelle .....                       | 45 |
| Figure II.18 : Chaudière à circulation assistée. ....                       | 46 |
| Figure II.19 : Chaudière a circulation forcée avec ballon.....              | 47 |
| Figure II.20 : Chaudière a circulation forcée sans ballon de démarrage..... | 47 |
| Figure II.21: Chaudière à un niveau de pression (1P) .....                  | 48 |
| Figure II.22: Chaudière à deux niveaux de pression (2P). ....               | 49 |
| Figure II.23: Chaudière à trois niveaux de pression (3P). ....              | 50 |
| Figure II.24: Diagramme (T-S) d'un cycle combiné .....                      | 51 |

## Chapitre III

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.1 : Vue en coupe de la SGT5-4000F.....                                    | 57 |
| Figure III.2 : La SGT5-4000F assemblée.....                                          | 58 |
| Figure III.3 Chaudière de récupération.....                                          | 59 |
| Figure III.4: schéma simplifié d'une chaudière de récupération.....                  | 59 |
| Figure III.5 : Les paramètres du circuit eau-vapeur en fonctionnement normal.....    | 66 |
| Figure III.6: Diagramme (T, S) à six soutirages de centrale Ras-Djinet.....          | 67 |
| Figure III.7 : le rendement du cycle actuel d'un groupe.....                         | 77 |
| Figure III.8: Courbes du rendement global de la centrale (TV+TG) .....               | 78 |
| Figure III.9 schéma simplifié de la nouvelle installation.....                       | 79 |
| Figure III.10 : Rendement du groupe transformé en fonction des charges.....          | 81 |
| Figure III.11 : rendement global de la nvl inst avec distribution de vapeur.....     | 83 |
| Figure III.12 : rendement global de la nvl inst avec diminution de charge.....       | 84 |
| Figure III.13: rendement globale de la nvl inst avec Pint d'un groupe est nulle..... | 85 |

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I.1 Les caractéristiques d'une chaudière.....                    | 14 |
| Tableau I.2 Les caractéristiques d'un économiseur.....                   | 15 |
| Tableau I.3 Les caractéristiques de ballon chaudière.....                | 15 |
| Tableau I.4 Les caractéristiques des surchauffeurs.....                  | 16 |
| Tableau I.5 Les caractéristiques des différents corps de la turbine..... | 18 |
| Tableau I.6 Les caractéristiques de condenseur.....                      | 19 |
| Tableau I.7 Les caractéristiques de la bache alimentaire.....            | 20 |
| Tableau I.8 Les caractéristiques des pompes d'extraction.....            | 20 |
| Tableau I.9 Les caractéristiques des pompes alimentaires.....            | 20 |
| Tableau I.10 Les caractéristiques des réchauffeurs bas pression.....     | 21 |
| Tableau I.11 Les caractéristiques des réchauffeurs hauts pression.....   | 21 |
| Tableau I.12 Les caractéristiques de l'alternateur.....                  | 22 |

### Chapitre II

|                                                                                           |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Tableau II.1 : Valeurs thermodynamiques des configurations usuelles des chaudières.....   | 44     |
| Tableau II.2 : les avantages et les inconvénients des 3 cycle (gaz, vapeur, combiné) .... | 53, 54 |

### Chapitre III

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau III.1 : Fiche technique de la SGT5-4000F.....                          | 56 |
| Tableau III.2 les performances de la SGT5-4000F .....                          | 57 |
| Tableau III.3 : températures et pressions dans chaque niveau de pression ..... | 60 |
| Tableau III.4 : Paramètres des différents points de cycle.....                 | 68 |
| Tableau III.5 : Les débits des soutirages.....                                 | 69 |
| Tableau III.6: les débits des fuites.....                                      | 69 |
| Tableau III.7: tableau des résultats.....                                      | 86 |

### Chapitre VI

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau IV.1 : les données de composantes de l'investissement..... | 92 |
| Tableau IV.2: Détermination du Taux de Rendement Interne TRI.....  | 93 |

## Liste des tableaux

---

Tableau IV.3: Valeurs de  $Cf/(1+0,12)^n$  et  $Cf/(1+0,12)^n$  cumulé.....94

Tableau IV.4 : tableau des résultats.....95

## Nomenclature

| Notations et symboles          |           |                                                           |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------|
| Symboles                       | Unité     | Signification                                             |
| S                              | KJ/Kg. °C | Entropie massique                                         |
| H                              | KJ/Kg     | Enthalpie massique                                        |
| $W_{T,TAV}$                    | KJ/Kg     | Le travail de la turbine à vapeur                         |
| $W_{pex}$                      | KJ/Kg     | Le travail de la pompe d'extraction                       |
| $W_{pa}$                       | KJ/Kg     | Le travail de la pompe alimentaire                        |
| $W_{Hp}$                       | KJ/Kg     | Le travail du corps HP                                    |
| $W_{Mp}$                       | KJ/Kg     | Le travail du corps MP                                    |
| $W_{Bp}$                       | KJ/Kg     | Le travail du corps BP                                    |
| Qch                            | KJ/Kg     | La quantité de chaleur fournie par la chaudière           |
| $P_{pex}$                      | W         | La puissance de la pompe d'extraction                     |
| $P_{pa}$                       | W         | La puissance de la pompe alimentaire                      |
| $P_u$                          | KW        | La puissance utile                                        |
| $P_{int}$                      | KW        | La puissance introduite dans la chaudière                 |
| $P_{uTG}$                      | KW        | La puissance utile de la turbine à gaz                    |
| $P_{intTG}$                    | KW        | La puissance introduite dans la turbine à gaz             |
| $P_{nv,ins}$                   | MW        | La puissance de la nouvelle installation                  |
| $Q_m$                          | Kg/s      | Le débit massique sortant de la chaudière à 25% de charge |
| $Q_{m25}$                      | Kg/s      | Le débit massique sortant de la chaudière à 50% de charge |
| $Q_{m50}$                      | Kg/s      | Le débit massique sortant de la chaudière à 75% de charge |
| $Q_{m75}$                      | Kg/s      | Le débit massique sortant de la chaudière                 |
| $(B_g+B_d)B_p$                 | Kg/s      | Le débit de fuite qui entre dans le corps BP              |
| $R_Q$                          | Kg/s      | Le débit de la vapeur auxiliaire                          |
| $Q_r$                          | Kg/s      | Débit des fuites récupérées                               |
| $Q_f$                          | Kg/s      | Débit des fuites                                          |
| S                              | Kg/s      | Débit de soutirages                                       |
| $m_e$                          | Kg/s      | Le débit d'eau qui travers le GVR                         |
| $Q_{HRSG}$                     | Kg/s      | Le débit vapeur sortant de GVR                            |
| $Q_{gaz,Chaud}$                | Kg/s      | Le débit des gaz brûlés                                   |
| $C_{e,froid}, C_{eau}$         | J/Kg. °C  | Capacité thermique massique de l'eau                      |
| $C_{chaud}$                    | J/Kg. °C  | Capacité thermique massique des gaz chauds                |
| $\Delta T$                     | °C        | La différence entre la température de sortie et d'entrée  |
| $T_e$                          | °C        | Température d'entrée des gaz brûlés                       |
| $T_s$                          | °C        | Température de sortie des gaz brûlés                      |
| $L_v$                          | KJ/Kg     | La chaleur latente de vaporisation de l'eau               |
| $E_p$                          | KJ/Kg     | L'énergie potentielle                                     |
| $E_c$                          | KJ/Kg     | L'énergie cinétique                                       |
| $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ | Kg/s      | Les six soutirages                                        |
| P                              | bar       | La pression                                               |
| q                              | W         | La puissance électrique                                   |
| C                              | DA/KWh    | Le coût du gaz naturel pour 1 KWh                         |
| t, n                           | année     | le nombre d'année                                         |
| $C_{sp}$                       | KJ/KWh    | La consommation spécifique                                |
| R                              | DA        | La recette annuelle de cycle actuel et transformé         |
| Ba                             | MDA       | Bénéfice actualisé                                        |
| VAN                            | MDA       | Vanne actuelle nette                                      |

## Nomenclature

|                      |        |                                                                                                            |
|----------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cf                   | MDA    | Cash flow                                                                                                  |
| Vr                   | DA/KWh | La valeur résiduelle de fin période                                                                        |
| I                    | MDA    | Le coût global de l'investissement                                                                         |
| I0                   | MDA    | Le cout de l'investissement initial                                                                        |
| i                    | %      | Le taux d'actualisation                                                                                    |
| TRI                  | %      | Le taux de rentabilité ou de rendement interne                                                             |
| DR                   | année  | Le délai de récupération                                                                                   |
| TRS                  | Année  | Le temps de retour simple sur l'investissement                                                             |
| $\eta_{cycle}$       | %      | Le rendement de cycle vapeur actuel                                                                        |
| $\eta_{cy25\%}$      | %      | Le rendement de cycle vapeur actuel à 25% de charge                                                        |
| $\eta_{cy50\%}$      | %      | Le rendement de cycle vapeur actuel à 50% de charge                                                        |
| $\eta_{cy75\%}$      | %      | Le rendement de cycle vapeur actuel à 75% de charge                                                        |
| $\eta_{global}$      | %      | Le rendement global de centrale à vapeur actuelle                                                          |
| $\eta_{global75\%}$  | %      | Le rendement global de la centrale actuelle a 75% de charge                                                |
| $\eta_{global50\%}$  | %      | Le rendement global de la centrale actuelle a 50% de charge                                                |
| $\eta_{global25\%}$  | %      | Le rendement global de la centrale actuelle a 25% de charge                                                |
| $\eta_{TG}$          | %      | Le rendement de la turbine à gaz choisie                                                                   |
| $\eta_{TGV\ 100\%}$  | %      | Le rendement global de la centrale actuelle avec une TAG                                                   |
| $\eta_{mTV}$         | %      | Le rendement mécanique de la turbine à vapeur                                                              |
| $\eta_{pex}$         | %      | Le rendement mécanique de la pompe d'extraction                                                            |
| $\eta_{pa}$          | %      | Le rendement mécanique de la pompe alimentaire                                                             |
| $\eta_{ch}$          | %      | Le rendement de la chaudière                                                                               |
| $\eta_{NI,grp25\%}$  | %      | Le rendement d'un groupe fonctionne avec la nouvelle installation à 25% de charge                          |
| $\eta_{NI,grp50\%}$  | %      | Le rendement d'un groupe fonctionne avec la nouvelle installation à 50% de charge                          |
| $\eta_{NI,grp75\%}$  | %      | Le rendement d'un groupe fonctionne avec la nouvelle installation à 75% de charge                          |
| $Rg_{Nv}$            | %      | Le rendement global de la centrale en présence de la nouvelle installation                                 |
| $\eta_{global,nv}$   | %      | Le rendement global de la centrale en présence de la nouvelle installation avec diminution de charge.      |
| $\eta_{global,Pi0,}$ | %      | Le rendement global de la centrale en présence de la nouvelle installation avec Pint d'un groupe égale à 0 |

## Nomenclature

| Abréviations | Définition                                |
|--------------|-------------------------------------------|
| SONELGAZ     | Société Nationale d'Electricité et du Gaz |
| GVR          | Générateur de Vapeur à Récupération       |
| TH           | Température Haute pression                |
| TM           | Température Moyenne Pression              |
| TB           | Température basse pression                |
| eco          | Economiseur                               |
| eva          | Evaporateur                               |
| sur          | Surchauffeur                              |
| resur        | Resurchauffeur                            |
| cond         | Condenseur                                |
| Pa           | Pompe alimentaire                         |
| Pex          | Pompe d'extraction                        |
| S1           | Première soutirage                        |
| S2           | Deuxième soutirage                        |
| S3           | Troisième soutirage                       |
| S4           | Quatrième soutirage                       |
| S5           | Cinquième soutirage                       |
| S6           | Sixième soutirage                         |
| HP           | Haute pression                            |
| MP           | Moyenne pression                          |
| BP           | Basse pression                            |
| THT          | Transformateur à haute tension            |
| HRSG         | Heat recovery steam generator             |
| 1P           | Un niveau de pression                     |
| 2P           | Deux niveaux de pression                  |
| 3P           | Trois niveaux de pression                 |
| RH           | Resurchauffe                              |
| IMV          | Installation motrice à vapeur             |
| Nvl inst     | Nouvelle installation                     |
| RDJ          | Ras Djinet                                |
| TAV, TV      | Turbine à vapeur                          |
| TAG, TG      | Turbine à gaz                             |
| SGP          | Siemens groupe                            |
| dTB          | Perte de température à basse pression     |
| dTM          | Perte de température à moyenne pression   |
| dTH          | Perte de température à haute pression     |

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Dans le monde moderne, l'électricité est un élément essentiel de la vie quotidienne. Il est donc nécessaire de savoir la produire d'une manière efficace et continue.

Le développement de l'énergétique exerce une influence décisive sur le développement de toute l'économie nationale de chaque pays.

L'électricité est assurée par une ou plusieurs centrales utilisant de l'énergie renouvelable ou conventionnelle.

En Algérie, la plupart des centrales actuelles sont thermiques à gaz et la puissance de ses centrales n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de pointe, d'où la nécessité d'apporter la solution technologique nouvelles basées sur une importante amélioration du rendement pour une meilleure production et efficacité énergétique.

La centrale thermique de Cap-Djinet a été construite dans le but de produire l'énergie électrique à partir de la vapeur d'eau suivant un circuit fermé.

Pour que la centrale de Cap-Djinet puisse répondre à la demande croissante en électricité, deux solutions peuvent être proposées :

- Utilisation de l'espace disponible pour construire une nouvelle centrale thermique à vapeur ou à gaz.
- Hybridation de la centrale actuelle de Cap-Djinet avec un cycle à gaz.

Cependant, On s'intéresse dans le présent travail à l'étude technico-économique de l'hybridation de la centrale avec un cycle à gaz. Dans le but d'accroître le rendement de la production, et diminuer la consommation de gaz.

A cet effet, notre mémoire comportera quatre chapitres et une conclusion générale suivants :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la centrale actuelle de Cap-Djinet.

Le deuxième est réservé aux généralités sur les trois cycles (cycle à vapeur, à gaz et combiné)

Le troisième chapitre traitera l'étude énergétique de l'installation actuelle et la nouvelle installation.



Le quatrième chapitre se basera sur l'étude économique du projet.

En fin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale reflétons l'ensemble des résultats obtenu.

# Chapitre I

**Présentation de la centrale de cap djinet**

## Introduction :

La construction de la centrale thermoélectrique de RAS\_DJINET a été effectuée dans le but de renforcer la production nationale en énergie électrique et subvenir ainsi aux besoins quotidiens du pays en cette énergie.

Cette centrale occupe une grande surface dans le système de production de l'énergie électrique car elle contribue au renforcement du potentiel et de la capacité de ce système et augmente la fiabilité du réseau électrique Algérien, et cela en débitant une puissance totale de 704 MW produites par l'intermédiaire de quatre groupes monoblocs d'une puissance unitaire de 176 MW. La puissance fournie au réseau est de 672 MW, le reste (environ 32 MW) est consommé par les auxiliaires.



Figure I.1 : la centrale thermique de Ras Djinet

### I.1. Historique

La centrale thermique de Ras Djinet a été construite dans les années 80 par le groupe austro-allemand SIEMENS-SGP qui avait la responsabilité des études, de la supervision du montage et du contrôle d'ouvrage, ainsi que d'une entreprise espagnole DRAGADOS à laquelle a été confiée la réalisation de la prise d'eau de la mer. [1]

La centrale est située au nord de l'Algérie dans la wilaya de Boumerdes, au bord de la mer, à 30 Km à l'est du centre de la wilaya et à 80 Km à l'est de la capitale (Alger). La centrale occupe une superficie de 35 hectares. Le site a été choisi sur la base de :

- ☐ Proximité de la mer.
- ☐ Possibilité d'extension.
- ☐ Proximité du consommateur important dans la zone industrielle Rouïba - Réghaia [1]

La durée de réalisation du projet a été de 5 ans (juin 1981 – fin septembre 1986). Les entreprises algériennes ayant participé à la réalisation sont :

ENCC, ETTERKIB, BATIMETAL, GENISIDER, INERGA, SNLB, PROSIDER,  
ENATUB, SNIC, GTP, SONATRAM, SOGEP.

Les principales opérations ont été réalisées selon le calendrier suivant :

- ☐ Travaux de génie civil : 1984-1985.
- ☐ Montage mécanique : 1984-1986.
- ☐ Montage électrique : 1984-1986. [1]

La mise en service des groupes de production s'est déroulée comme suit :

Groupe 1 en décembre 1985.

Groupe 2 en avril 1986.

Groupe 3 en septembre 1986.

Groupe 4 en décembre 1986. [1]

La première fourniture d'énergie électrique au réseau s'est effectuée le 17 Juin 1986.

Le graphe suivant représente la production de l'énergie électrique de la centrale sur une période de 12 années :

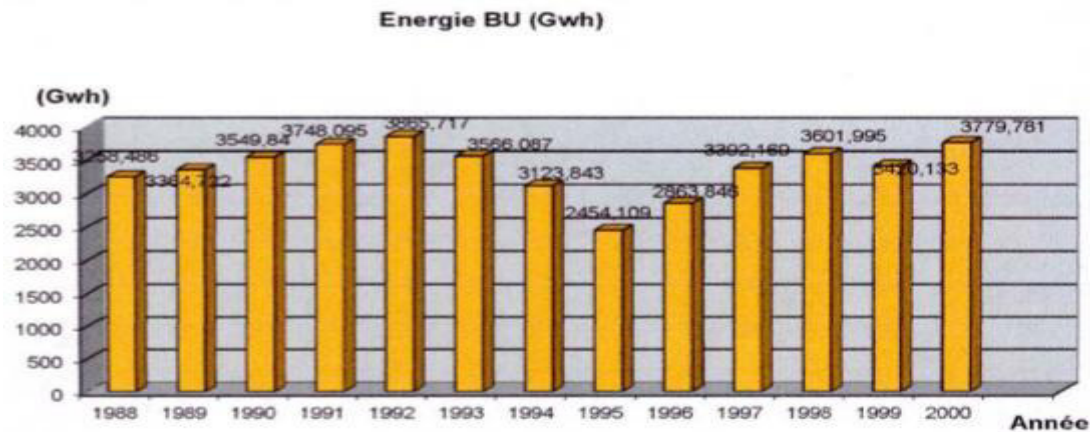


Figure I.2 : Energie produit de la centrale thermique

## I.2.Rôle de la centrale thermique [1]

Le rôle d'une centrale thermique est de transformer l'énergie chimique contenue dans un combustible, en énergie électrique en passant par l'intermédiaire de l'énergie thermique et mécanique. Cette transformation s'opère dans divers appareils en utilisant les propriétés physiques de l'eau sous ses diverses formes liquides et vapeur.

## I.3.Plan de masse [1]

Il est présenté dans la figure ci-après :

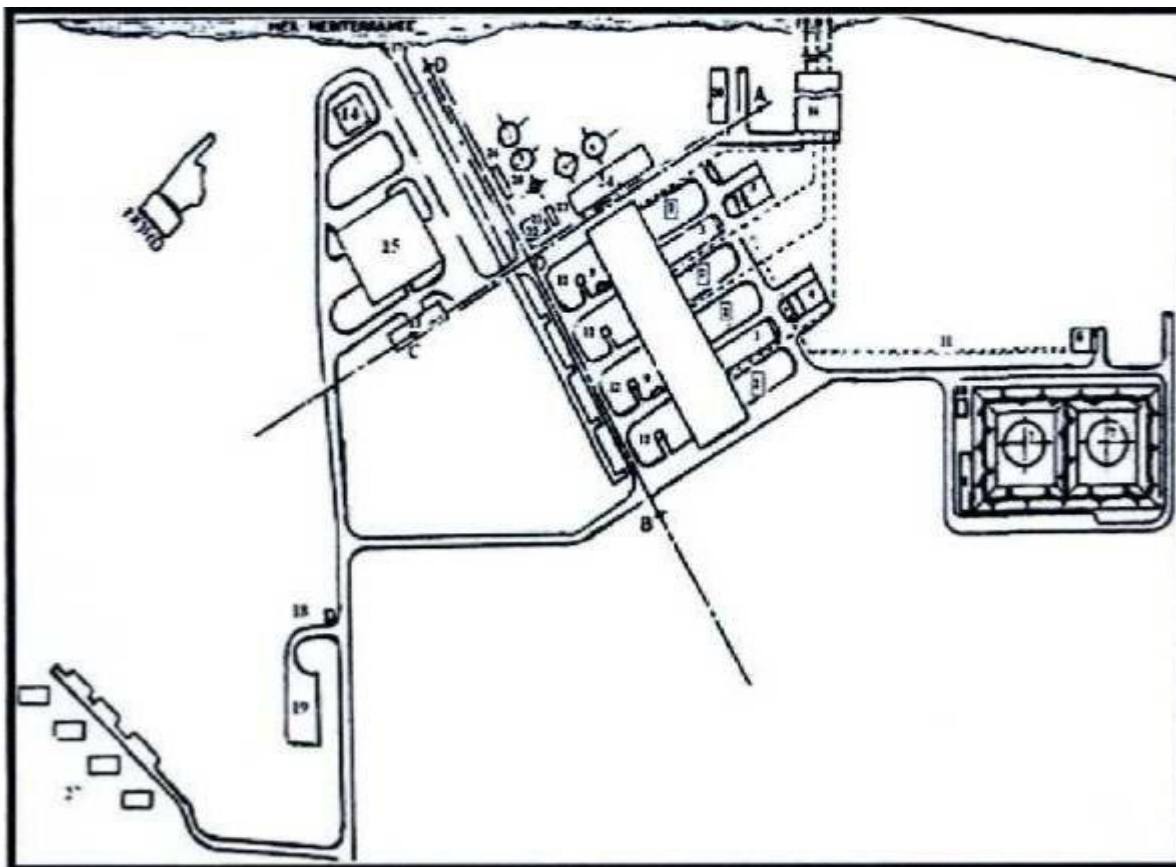


Figure I.3 : Plan de masse de la centrale

| Légende                               |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| 1- Salle des machines                 | 15- Atelier magasin                |
| 2- Chaudière                          | 16- Station de pompage             |
| 3- Locaux des auxiliaires électriques | 17- Canal et rejet d'eau de mer    |
| 4- Locaux des auxiliaires mécaniques  | 18- Poste de garde                 |
| 5- Tour de prise d'eau de mer         | 19- Parking                        |
| 6- Station de détente de gaz          | 20- Station de chloration          |
| 7- Réservoir stockage fuel            | 21- Préparation d'eau potable      |
| 8- Station pompage et dépotage fuel   | 22- Déminéralisation               |
| 9- Station de pompage $H_2$           | 23- Fosse de neutralisation        |
| 10- Poste d'incendie à mousse         | 24- Dessalement d'eau de mer       |
| 11- Rack à tuyauterie                 | 25- Station des pompes d'incendies |
| 12- Air de transformateur             | 26- Pompe d'eau déminéralisée      |
| 13- Bâtiment administrative           | 27- Logements d'exploitation       |
| 14- Cantine                           |                                    |



### I.4. Plan de situation :

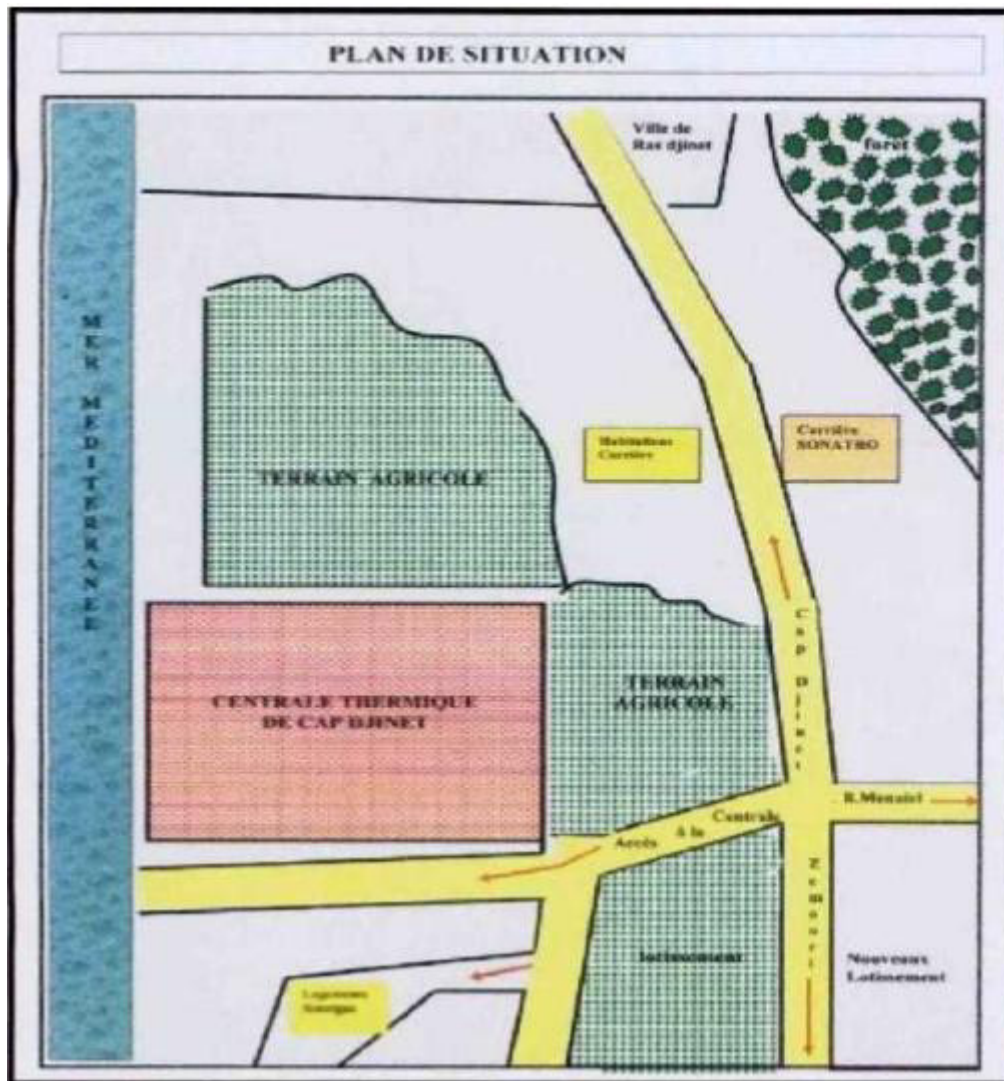


Figure I.4 : Plan de situation de la centrale



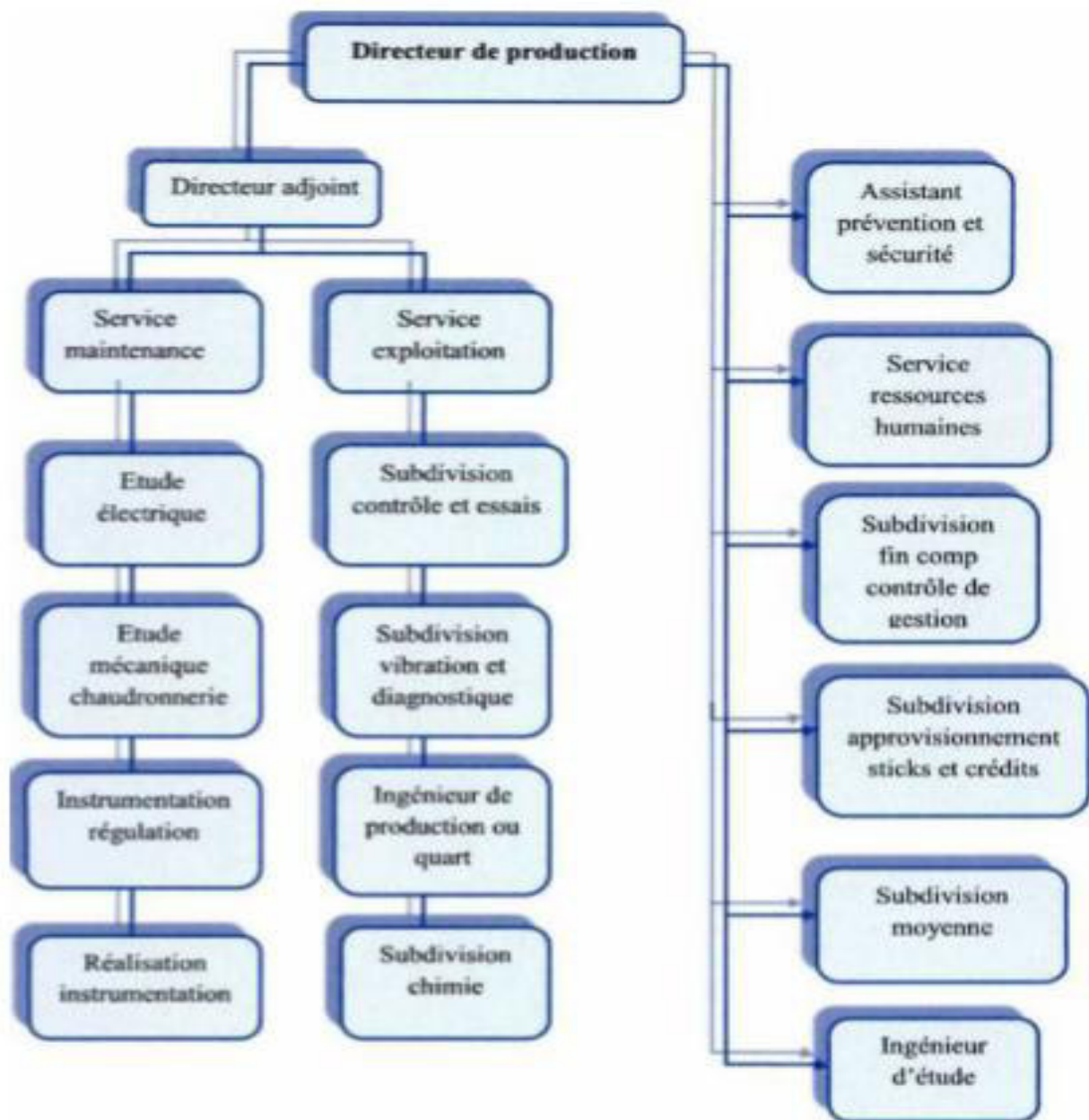
**I.5.Organigramme :**

Figure I.5 : Organigramme de la centrale

## **I.6. Les constitutions de la centrale :**

### **I.6.1 Stations :**

#### **➤ Station de dessalement**

La station de dessalement a pour rôle de produire l'eau dessalée à partir de l'eau de mer. Quatre (04) unités de dessalement produisant 500 m<sup>3</sup> /jour chacune assurent la production en eau dessalée, stockée dans deux (02) bâches (2 x 2700 m<sup>3</sup>). [1]

#### **➤ Station De Déminéralisation**

Deux chaînes de déminéralisation de 40 m<sup>3</sup>/h chacune, parachèvent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau-vapeur. Les lits mélangés sont un mélange de résines cationique et anionique. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m<sup>3</sup> chacun. [1].

#### **➤ Station de filtrage et de pompage d'eau de mer :**

a/Amené d'eau de mer

L'amené d'eau de mer s'effectue à partir de (03) trois canalisations indépendantes de 3m de diamètre chacune, dont la prise est située à 900m au large.

b/ Filtration d'eau de mer

La filtration d'eau de mer s'effectue en deux étapes :

1-une première filtration au niveau des grilles à grappins pour stopper et récupérer les gros déchets et organismes arrivant avec l'eau de mer tels que : moules, oursins.

2-une deuxième filtration s'effectue au niveau des tambours filtrants pour la récupération des objets et organismes de petite taille, qui n'ont pas pu être stoppés par les grilles à grappins.

c/pompage d'eau de mer :

Le pompage s'effectue dans des puits situés après la station de filtrage, par trois groupes de pompes différents, pour le besoin de la centrale.

-pompe d'alimentation en eau de mer de refroidissement.

-pompes d'alimentations en eau de mer pour l'unité de dessalement.

-pompes d'alimentations en eau de mer pour l'électro-chloration.

➤ **Station d'électro-chloration :**

La chloration de l'eau de mer permet de protéger le circuit d'eau de mer (condenseur, conduite d'amenée d'eau de mer ....) contre tout encrassement pouvant être causé par les microorganismes marins. Elle se fait par injection d'hypochlorite de sodium.

L'installation est prévue pour produire (2\*150 kg/h) de chlore avec deux unités .en condition de chloration continue ,104000 m<sup>3</sup>/h d'eau de circulation sont continuellement chlorés.

➤ **Station de production d'hydrogène :**

La production de l'hydrogène est basée sur le principe de l'électrolyse de l'eau déminéralisée dans un bloc de cellules (anodes / cathodes) appelé électrolyseur .l'hydrogène est récupéré à la cathode, l'oxygène à l'anode. L'hydrogène produit sert au refroidissement des quarts alternateurs de la centrale. Sous une pression de 3 bars, en circuit fermé, l'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction.

### **I.6.2.les circuits :[2]**

➤ **Circuit des combustibles :**

Le gaz naturel parvient à la station de détente de gaz par pipe enterré.

Quatre tubes distribuent ce gaz aux chaudières de chaque tranche ; tandis que les autres tubes conduisent ce combustible aux autres consommateurs comme l'unité de dessalement d'eau de mer.

➤ **Circuit d'air de combustion :**

L'air est prélevé de l'atmosphère et mis en vitesse par les ventilateurs ; il est d'abord réchauffé vers « 315 °C » par la vapeur auxiliaire dans le réchauffeur d'air et les gaz de combustion dans le réchauffeur d'air rotatif. Cet air réchauffé va aux brûleurs en fournissant l'appoint d'oxygène nécessaire à la combustion.

➤ **Circuit d'eau et de vapeur : [3]**

C'est le circuit principal et tous les autres gravitent autour de lui.

- Première transformation :

L'eau froide est prise à la bache alimentaire alimentée par le condenseur et par l'eau d'appoint après distillation ; elle est comprimée successivement par les pompes basse pression et haute pression, et réchauffée par les réchauffeurs BP et HP au moyen de vapeur de soutirage ; elle passe enfin à l'économiseur où les gaz de combustion élèvent encore sa

température, avant son introduction à la chaudière. Au début de la transformation l'eau était à une température de 33°C et la pression absolue de 0,05 bars, à la fin, elle est à 285 °C et à 160 bars environ.

- Deuxième transformation :

Elle s'effectue dans la chaudière. L'eau chaude Comprimée arrive au réservoir supérieur ; elle parcourt les parois tubulaires Qui tapissent la chambre de combustion ; à travers ces tubes, les gaz de combustion, qui sont à 300°C, fournissent à l'eau d'abord un complément de chaleur pour l'amener à la température d'ébullition, puis la chaleur de vaporisation. A la partie supérieure du réservoir, on recueille de la vapeur saturée humide ; celle-ci est dirigée sur trois faisceaux tubulaires en série, la vapeur se sèche dans le premier la surchauffe s'effectue dans les faisceaux suivants Pendant cette transformation la pression ne change pas, la température atteint son maximum 540°C.

-Troisième transformation :

La vapeur surchauffée arrive à la partie HP de la turbine, où elle se détend à 40 bars et où elle se refroidit à 357°C ; elle fournit donc un premier travail moteur, puis elle retourne dans le foyer où elle circule dans le faisceau tubulaire de resurchauffe ; la pression ne varie guère, mais la température atteint pour la deuxième fois son maximum de 540°C. La vapeur revient à la turbine, se détend et se refroidit dans les étages MP et BP, en fournissant à nouveau un travail moteur

- Quatrième transformation

Elle s'effectue dans le condenseur ; la condensation de la vapeur s'y effectue sous vide (0,05 bars), à la température de 33°C environ. L'eau recueillie est froide ; elle recommence alors son cycle.

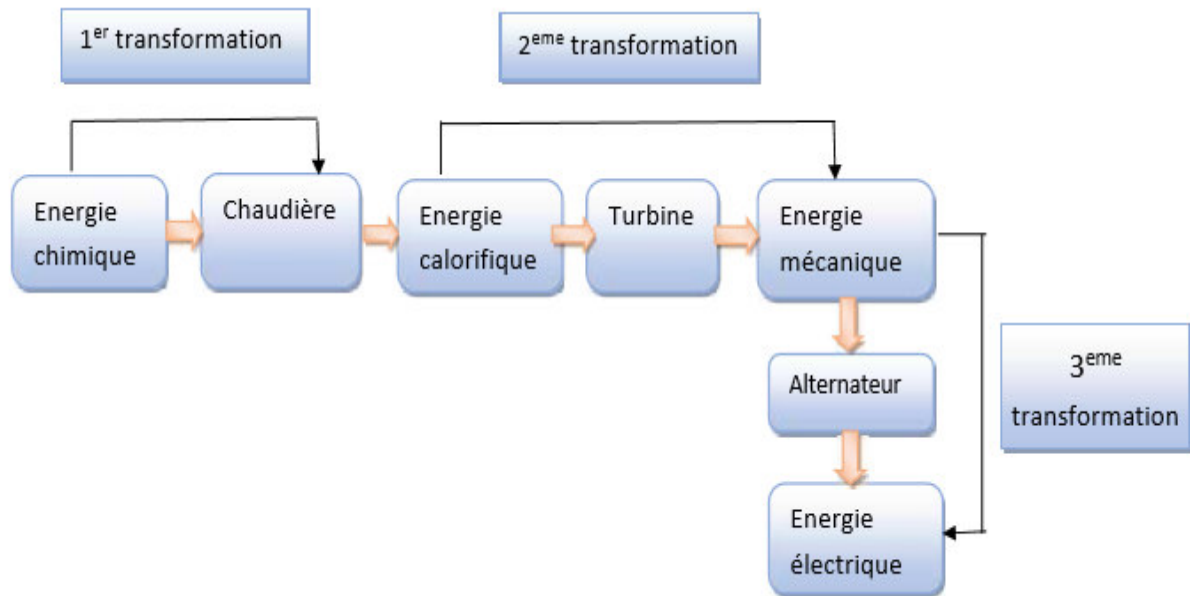


Figure I.6 : principales transformations d'énergie

➤ **Circuit d'eau du refroidissement :**

Pour condenser la vapeur, il faut refroidir et abaisser sa pression ; ces deux opérations s'effectuent dans le condenseur ; le refroidissement est assuré par l'eau froide ; circulant dans un circuit indépendant de circuit eau-vapeur. L'eau ordinaire peut donc être utilisée ; le vide est entretenu par des pompes d'extractions.

➤ **Circuit auxiliaire :**

Beaucoup d'autres circuits sont associés à la partie thermique, il n'en est cité que quelques-uns.

**- L'eau d'appoint :**

Elle a pour but de compenser les pertes du circuit principal « eau-vapeur » ; le débit d'appoint est d'environ « 1% » du débit principal. L'eau d'appoint doit être filtrée, déminéralisée, distillée puis dégazée.

Ce traitement a pour but d'éviter des dépôts dans les tubulures et de limiter leur oxydations et ou de leurs éviter tout autre attaque chimique.

**-Soutirages [4]:**

Nous avons vu que le réchauffage de l'eau venant du condenseur était effectué au moyen de vapeur soutirée de la turbine ; la distillation de l'eau d'appoint s'effectue également par un soutirage de vapeur.

Dans les réchauffeurs d'eau, les circuits de l'eau à chauffer et de la vapeur de soutirage sont séparés ; la vapeur se refroidit et se recondense ; les circuits de soutirage se prolongent donc par des circuits d'évacuation des condensats en direction du condenseur.

**-Désurchauffe :**

Il est nécessaire que la température maximale de la vapeur soit respectée pour obtenir un bon rendement. Dès que la température de la vapeur dépasse la température limite, il y a automatiquement diminution de l'allure de chauffe ; simultanément, on injecte de l'eau chaude HP dans les faisceaux surchauffeurs ; cette eau se vaporise tout de suite en refroidissant la vapeur surchauffée ; la désurchauffe disparaît quand le réglage de l'allure de chauffe est devenu efficace.

L'importance de la partie thermique ne doit faire oublier qu'elle n'a finalement qu'un but d'entraîner à 3000 tr/min le rotor de l'alternateur ; les circuits thermiques se prolongent en quelque sorte par les circuits électriques de puissance ; ceux-ci comprennent l'alternateur, le transformateur principal et l'appareillage THT permettant d'acheminer l'énergie électrique vers les jeux de barres du poste de départ.

Ils ont pour but de soutenir l'usine en énergie électrique partout où l'on a besoin d'elle : des moteurs, des ventilateurs, des pompes etc. Globalement, la puissance consommée est considérable : 8% à 10% de puissance nette, c'est véritable réseau de distribution intérieur qu'est nécessaire.

➤ **Circuit électrique :**

**- Circuit de puissance :**

L'importance de la partie thermique ne doit faire oublier qu'elle n'a finalement qu'une but d'entraîner à 3000 tr/min le rotor de l'alternateur ; les circuits thermique se prolongent en quelque sorte par les circuits électriques de puissance ; ceux-ci comprennent l'alternateur, le transformateur principale et l'appareillage THT permettant d'acheminer l'énergie électrique vers les jeux de barre du poste de départ. [2]

**-Circuits auxiliaires :**

Ils ont pour but de soutenir l'usine en énergie électrique partout où l'on a besoin d'elle : des moteurs, des ventilateurs, des pompes etc. Globalement, la puissance consommée est considérable : 8% à 10% de puissance nette, c'est véritable réseau de distribution intérieur qu'est nécessaire.

**➤ Commande et contrôle :**

Chaque paire de tranches est contrôlée et réglée depuis la salle de commande, et la centrale caractérisée par un degré élevé d'automatisme et centralisation, on dénombre une quarantaine de chaînes de régulation par groupe production qui permet un pilotage automatique du groupe.

**➤ Système de surveillance, d'alarme et d'analyse :**

Pour permettre une bonne conduite du groupe de production, des paramètres d'exploitation (température, pression, niveau d'eau, vibration, etc.) des différents équipements du groupe sont indiqués, enregistrés en permanence en salle de commande et signaler en cas de dépassement de seuil. Pour une meilleure analyse en cas d'incendie un consigneur est installé. Il permet d'enregistrer les alarmes dans un ordre chronologique.

**I.7. Les principaux organes de la centrale :**

- Générateur de vapeur (chaudière)
- Turbine.
- Condenseur.
- Bâche alimentaire.
- Pompe d'extraction.
- Pompe d'alimentation.
- Réchauffeur haute pression.
- Réchauffeur basse pression.
- Alternateur.

**I.8. Les caractéristiques techniques de principaux organes de la centrale :****➤ Générateur de vapeur (chaudière) : [4]**

Le rôle de la chaudière est de faire passer l'eau d'alimentation de l'état liquide à l'état vapeur surchauffée à haute pression et à une température plus élevée.





Figure I.7: Générateur de vapeur

Ses caractéristiques sont :

|                                                 |                 |
|-------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Capacité de vaporisation</b>                 | <b>540 t/h</b>  |
| <b>Pression à la sortie des resurchauffeurs</b> | <b>147 bars</b> |
| <b>Température de la vapeur surchauffée</b>     | <b>540 °C</b>   |
| <b>Température de la vapeur resurchauffée</b>   | <b>535 °C</b>   |
| <b>Température de l'eau alimentation</b>        | <b>246 °C</b>   |
| <b>Température de sortie de fumée</b>           | <b>118 °C</b>   |
| <b>Température dans le foyer</b>                | <b>900 °C</b>   |

**Tableau I.1 : Les caractéristiques d'une chaudière**



- **Le circuit eau vapeur :**
- **L'économiseur :**

C'est un échangeur de chaleur, constitue d'un serpentin placé en fin de parcours des gaz de combustion. L'eau en provenance du poste de réchauffage, alimente par les soutirages de turbine, se réchauffe dans l'économiseur avant son introduction dans le ballon à une température inférieure à celle d'ébullition.

Ses caractéristiques sont :

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| <b>Surface d'échange</b>   | <b>2080 m<sup>2</sup></b> |
| <b>Volume d'eau</b>        | <b>10,5 m<sup>3</sup></b> |
| <b>Pression de service</b> | <b>164,3 bars</b>         |

**Tableau I.2 : Les caractéristiques d'un économiseur.**

- **Le ballon chaudière :**

Ses caractéristiques sont :

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| <b>Pression de service</b> | <b>160 bars</b>           |
| <b>Volume d'eau</b>        | <b>26,9 m<sup>3</sup></b> |

**Tableau I.3 : Les caractéristiques de ballon chaudière.**

- **Colonnes de descente et les écrans de vaporisation :**

Les colonnes de descente sont raccordées à la partie inférieure de ballon et conduisent l'eau grâce à son propre poids à la partie inférieure de l'écran vaporisateur.

- **Les surchauffeurs et les resurchauffeurs :**

Les surchauffeurs au nombre de trois (primaire, secondaire et tertiaire), permettent grâce à la récupération de la chaleur sensible des fumées provenant du foyer, élève la température de la vapeur au-delà du point de saturation pour atteindre la température de 540 °C afin d'éliminer l'humidité contenue dans cette vapeur pour améliorer le rendement de la turbine.

Ses caractéristiques sont :

| Paramètre           | Surface de chauffe<br>[m <sup>2</sup> ] | Pression de service<br>[Bar] | Température de<br>sortie [C°] |
|---------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| <b>Surchauffeur</b> | <b>1565</b>                             | <b>160</b>                   | <b>427</b>                    |
| <b>Surchauffeur</b> | <b>581</b>                              | <b>150</b>                   | <b>485</b>                    |
| <b>Surchauffeur</b> | <b>538</b>                              | <b>145,5</b>                 | <b>540</b>                    |

Tableau I.4 : Les caractéristiques des surchauffeurs

➤ **Désurchauffeurs :**

Par injection d'eau sert à la stabilisation de la température de sortie lorsque ils sont entre les resurchauffeurs premiers et secondaires, et à la protection des surchauffeurs et des premiers étages du groupe. Contre des températures élevées et maintiennent la température à la sortie de la chaudière. L'échanger se fait par convection.

➤ **Le circuit air fumées :**

➤ **Ventilateurs de soufflage :**

Ce sont des ventilateurs qui fournissent l'air nécessaire pour une bonne combustion.

➤ **Ventilateurs de recyclage:**

Ont pour rôle de recycler en fonction de la charge les pertes et les fumées issues de la combustion afin de régler la température à la sortie des resurchauffeurs.

➤ **Pré chauffeur :**

D'air à vapeur sert à l'augmentation de la température de l'air de combustion avant le réchauffeur rotatif.

➤ **Réchauffeur rotatif :**

D'air de combustion sert à réchauffer l'air de combustion par récupération d'air des fumées.

➤ **Les brûleurs :**

Le générateur de vapeur est équipé par huit brûleurs fonctionnant au gaz naturel ou au fuel. Ils sont disposés sur quatre étages de face avant de la chaudière.

➤ **La chambre de combustion :**

Elle représente la source de la chaleur du générateur de vapeur. Elle est constituée de tubes écran qui reçoivent la chaleur émise par les flammes des brûleurs. Un système de contrôle (regarde et cameras) est prévu pour la surveillance de cet organe.

➤ **La cheminée :**

La chaudière est équipée d'une cheminée d'une hauteur de 60 mètres au-dessus du sol. Elle est de construction métallique.

❖ **Le principe de fonctionnement de la chaudière :**

L'eau d'alimentation sortant des réchauffeurs HP va rentrer dans la chaudière et particulièrement de réchauffer dans la l'économiseur. Elle est canalisées ensuite vers le ballon et à la sortie de l'économiseur, l'eau est encore à l'état liquide. Pour avoir de la vapeur il faut encore la chauffer. Alors de ballon elle descend vers les écrans vaporisateurs. Au contact de la flamme des brûleurs. L'eau doit produire de la vapeur et monte naturellement jusqu'au ballon, du fait de la différence de densité entre l'eau et la vapeur.

Dans le ballon s'opère une séparation de l'eau et de la vapeur puisque celle-ci est transmise aux surchauffeurs par les tubes support. A la sortie de surchauffeur finale, la vapeur acheminée vers la turbine pour subir la détente.

➤ **La turbine :**

Ces caractéristiques :

- ✓ Puissance à la borne d'alternateur : **176 MW**
- ✓ Vitesse de rotation : **3000 tr/min.**



Figure I.8 : une turbine

- **Caractéristiques des différents corps de la turbine :**

|                                   | <b>Corps HP</b><br><b>Haute Pression</b> | <b>Corps MP</b><br><b>Moyenne Pression</b> | <b>Corps BP</b><br><b>Basse Pression</b> |
|-----------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Pression admission</b>         | 138 bars                                 | 35,9 bars                                  | 5,5 bars                                 |
| <b>Debit de vapeur</b>            | 523 t/h                                  | 407,9 t/h                                  | 40 t/h                                   |
| <b>Température de vapeur</b>      | 535 °C                                   | 535 °C                                     | 282,5 °C                                 |
| <b>Nombre d'étages à réaction</b> | 23                                       | 2*20                                       | 2*8                                      |
| <b>Nombre d'étages à action</b>   | 1                                        | Aucun étage                                | Aucun étage                              |
|                                   | Simple flux et double enveloppe          | Double flux et double enveloppe            | Double flux et double enveloppe          |

**Tableau I.5 : Les caractéristiques des différents corps de la turbine.**

- **Le condenseur :**

C'est un échangeur de chaleur par surface de type fluide séparé et à faisceaux tubulaires, Il est placé directement sous le corps BP de la turbine.



**Figure I.9 : Le Condenseur**

Ses caractéristiques sont :

|                                          |                            |
|------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Surface d'échange</b>                 | <b>10101 m<sup>2</sup></b> |
| <b>Epaisseur de la paroi des tubes</b>   | <b>0,7 mm</b>              |
| <b>Vitesse de l'eau dans les tubes</b>   | <b>1,8 m/s</b>             |
| <b>Hauteur de la boîte à eau</b>         | <b>2600 mm</b>             |
| <b>Longueur des tubes</b>                | <b>19 mm</b>               |
| <b>Diamètre extérieur</b>                | <b>11500 mm</b>            |
| <b>Longueur total du condenseur</b>      | <b>14965 mm</b>            |
| <b>Température d'entrée</b>              | <b>20 °C</b>               |
| <b>Débit vapeur</b>                      | <b>98,25 Kg/s</b>          |
| <b>Débit de l'eau de refroidissement</b> | <b>6500 Kg/s</b>           |
| <b>Pression de condenseur</b>            | <b>0,07 bar</b>            |
| <b>Masse totale à vide</b>               | <b>250 tonnes</b>          |

**Tableau I.6 : Les caractéristiques de condenseur.**

- **La bache alimentaire :**

C'est un réservoir cylindrique combiné avec un dégazeur, il reçoit de l'eau en provenance de la pompe d'extraction, qui traverse un certain nombre de réchauffeurs. Il reçoit également de la vapeur en provenance de soutirage S4 de la turbine et du condensat auxiliaire des réchauffeurs (HP).



**Figure I.10: La bache alimentaire**

Ses caractéristiques sont :

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <b>Pression</b>                | <b>5 bars</b> |
| <b>Température</b>             | <b>150° C</b> |
| <b>Longueur</b>                | <b>16,5 m</b> |
| <b>Volume</b>                  | <b>163 m³</b> |
| <b>Diamètre de l'enveloppe</b> | <b>3,6 m</b>  |

**Tableau I.7 : Les caractéristiques de la bâche alimentaire.**

- **Les pompes :**

On distingue deux types de pompes :

- **Les pompes d'extraction :**

Ses caractéristiques :

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| <b>Type de pompe</b>       | <b>Centrifuges à 3 étages</b> |
| <b>Débit d'extraction</b>  | <b>414 Kg/s</b>               |
| <b>Vitesse de rotation</b> | <b>1419 tr/min</b>            |
| <b>Puissance</b>           | <b>300 KW</b>                 |
| <b>Tension</b>             | <b>6,3 KV</b>                 |

**Tableau I.8 : Les caractéristiques des pompes d'extraction.**

- **Les pompes alimentaires :**

Ses caractéristiques sont :

|                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| <b>Type de pompe</b>           | <b>Centrifuges à 1 étage</b> |
| <b>Débit d'alimentation</b>    | <b>2*261 Kg/s</b>            |
| <b>Pression d'aspiration</b>   | <b>5,6 bars</b>              |
| <b>Pression de refoulement</b> | <b>10,5 bars</b>             |

**Tableau I.9 : Les caractéristiques des pompes alimentaire.**

- **Les réchauffeurs :**

Les réchauffeurs sont des échangeurs de chaleur, leurs rôle est de réchauffer l'eau d'alimentation, et récupérer la chaleur sensible des fumées pour réchauffer l'air de combustion.

- **Les réchauffeurs BP:**

Ses caractéristiques sont :

|                         | Cote tube |             |             | Cote enveloppe |             |             |
|-------------------------|-----------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| Paramètres              | Pression  | Température | Volume      | Pression       | Température | Volume      |
|                         | Bar       | °C          | L           | bar            | °C          | L           |
| <b>Réchauffeurs BP1</b> | <b>24</b> | <b>135</b>  | <b>1400</b> | <b>2</b>       | <b>16</b>   | <b>9000</b> |
| <b>Réchauffeurs BP2</b> | <b>24</b> | <b>135</b>  | <b>1700</b> | <b>2</b>       | <b>150</b>  | <b>4900</b> |
| <b>Réchauffeurs BP3</b> | <b>24</b> | <b>160</b>  | <b>1400</b> | <b>5</b>       | <b>200</b>  | <b>3600</b> |

**Tableau I.10 : Les caractéristiques des réchauffeurs bas pression.**

- **Les réchauffeurs HP :**

Ses caractéristiques sont :

|                        | Cote tube  |             |             | Cote enveloppe |             |             |
|------------------------|------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| Paramètres             | Pression   | Température | Volume      | Pression       | Température | Volume      |
|                        | Bar        | °C          | L           | bar            | °C          | L           |
| <b>Réchauffeur HP1</b> | <b>235</b> | <b>230</b>  | <b>2116</b> | <b>22,5</b>    | <b>460</b>  | <b>6363</b> |
| <b>Réchauffeur HP2</b> | <b>235</b> | <b>280</b>  | <b>2791</b> | <b>49,03</b>   | <b>400</b>  | <b>6376</b> |

**Tableau I.11 : Les caractéristiques des réchauffeurs hauts pression.**

- **L'alternateur :**

Il transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. Il est refroidi par l'hydrogène circulant en circuit fermé qui présente des avantages par rapport à l'air.

Ses caractéristiques sont :

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| <b>Tension nominale</b>   | <b>15,5 KV</b> |
| <b>Puissance apparent</b> | <b>220 KVA</b> |
| <b>Puissance active</b>   | <b>176 MW</b>  |

**Tableau 1.12 : Les caractéristiques de l'alternateur.**

- ❖ **Réfrigérant d'alternateur :**

Les quatre réfrigérant d'hydrogène (H<sub>2</sub>) (4\*25%) sont logée horizontalement à l'intérieur de l'enveloppe de l'alternateur. L'échange de chaleur entre l'H<sub>2</sub> et l'eau de refroidissement s'effectue par l'intermédiaire de tubes à ailettes parcourus par l'eau.

- ❖ **Condenseur de buées :**

Le condenseur de buées a pour rôle de récupérer la vapeur de fuite (mélange buée/air) venant des espaces extrêmes des garnitures d'étanchéité.

- ❖ **Ejecteurs d'air-vapeur :**

Leur fonction est d'extrême les incondensables du condenseur pour augmenter le vide, le condenseur est mis sous vide à l'aide des éjecteurs de démarrage et pendant le service le vide est maintenu par les unités d'éjections de service.

- ❖ **Refroidisseur des purges :**

Le condensat auxiliaire rassemblé au réchauffeur BP1 s'écoule jusqu'au refroidisseur des purges et est refroidi jusqu'à la température de 43.8 °C. Le condensat principal se trouve ainsi réchauffé. Le condensat auxiliaire refroidi est conduit au condenseur.

## **I.9.Fonctionnement d'une tranche de production :**

Après le traitement de l'eau de mer (dessalement, filtrage, déminéralisation), elle est envoyée à la bêche alimentaire par le condenseur, et elle est comprimée successivement par les pompes BP et HP, elle est ensuite réchauffée par les réchauffeurs BP et HP au moyen de la vapeur de soutirage.



L'eau d'alimentation en sortant des réchauffeurs HP va évacuer dans la chaudière est particulièrement dans l'économiseur, elle est canalisée ensuite vers le ballon, la moitié supérieure du ballon de chaudière contient de la vapeur saturée celle-ci est dirigée vers les trois surchauffeurs, A la sortie de surchauffeur finale, la vapeur est acheminée vers la turbine

Pour subir la détente, dans cette étape la température de la vapeur diminue en sortant du corps HP et pour augmenter la chaleur maximale de cette vapeur, elle passe par les resurchauffeurs.

A la sortie des resurchauffeurs, la vapeur suit sa détente dans le corps MP puis BP, pour faire pivoter l'arbre de l'alternateur.

La vapeur détendue est conduite au condenseur, pour transformer la vapeur en eau par le condenseur où l'eau se refroidit, ce refroidissement est effectué par l'eau de refroidissement liée au condenseur et indépendante du circuit eau-vapeur. La condensation pour recommencer le cycle de nouveau.

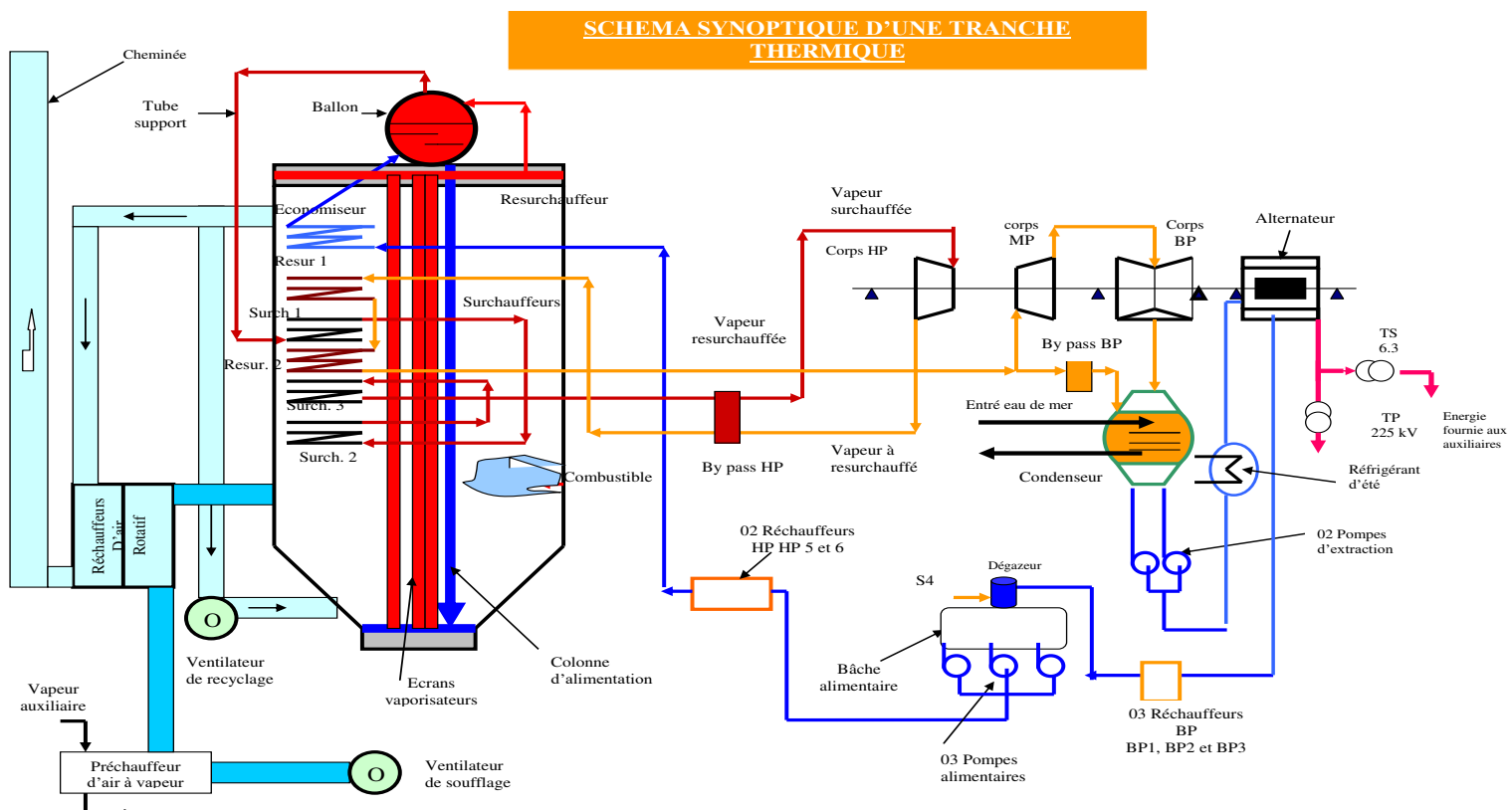


Figure I.11 : principaux composants et circuits d'une tranche thermique de la centrale

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté la centrale à vapeur de Cap Djinet en générale, avec ses différentes station qui est à son tour est transformé en énergie électrique grâce à l'alternateur suit un parcours partant par son passage par les brûleurs. En décrivant un cycle thermodynamique.

# Chapitre II

**Généralités sur les cycles (à vapeur, à gaz, combiné)**

## Introduction :

Dans ce chapitre on veut identifier les turbines à vapeur et les turbines à gaz ainsi que le cycle combiné.

En termes de principes de fonctionnement, applications, classification, avantages et inconvénients.

### II.1.Turbine à vapeur :

#### II.1.1.Définition : [5]

La turbine à vapeur est un type de machine à moteur thermique dans laquelle l'énergie thermique de la vapeur est convertie en énergie mécanique. La construction de la turbine à vapeur est très simple. Il se compose d'un rotor et d'un ensemble d'aubes tournantes reliées à un arbre placé au centre du rotor. Un générateur électrique appelé générateur à turbine à vapeur est relié à l'arbre du rotor. Ce dernier collecte l'énergie mécanique de l'arbre et la convertit en énergie électrique.

Le générateur à turbine à vapeur améliore également le rendement de la turbine.

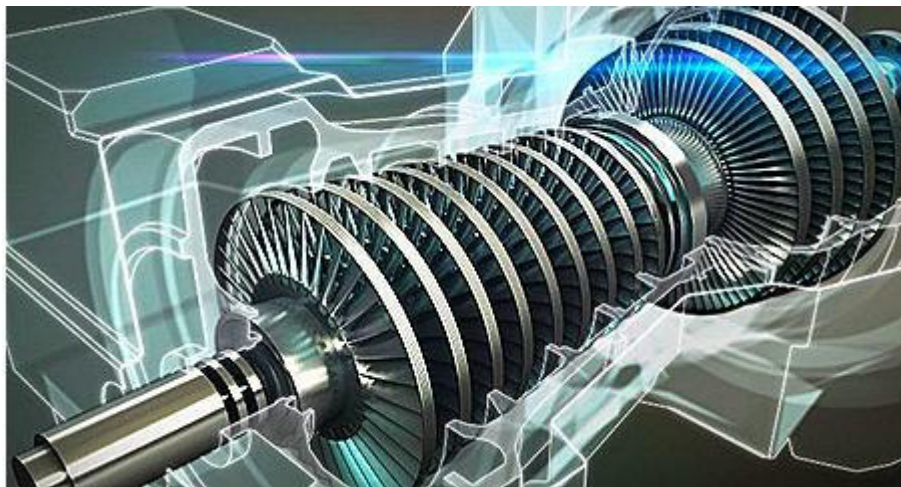


Figure II.1 : turbine à vapeur

#### II.1.2.Histoire de la turbine à vapeur : [6]

La première turbine à vapeur a été inventée par le mathématicien grec Hero d'Alexandrie , elle était du type à mouvement alternatif. La turbine à vapeur moderne a été fabriquée par monsieur Charles Parsons en 1884. La conception a été modifiée à plusieurs reprises. La capacité de la turbine passe de 0,75 kW à 1 000 MW. Il s'agit d'un large éventail d'utilisations telles que pompes, compresseurs, etc. Une turbine à vapeur moderne est également utilisée comme moteur dans une grande centrale thermique.

**II.1.3.Principe de fonctionnement de la turbine à vapeur : [7]**

Le principe de fonctionnement de la turbine à vapeur dépend de l'action dynamique de la vapeur. Une vapeur à grande vitesse provient des buses et frappe les aubes rotatives montées sur un disque monté sur un arbre. Cette vapeur à haute vitesse produit une pression dynamique sur des pales dans lesquelles les pales et l'arbre commencent tous les deux à tourner dans le même sens. En gros, dans une turbine à vapeur, l'énergie de pression des extraits de vapeur est convertie en énergie cinétique en permettant à la vapeur de s'écouler à travers les buses. La conversion de l'énergie cinétique travail aux pales du rotor et le rotor est connecté à un générateur de turbine à vapeur qui agit en tant que médiateur. Le générateur de turbine recueille l'énergie mécanique du rotor et convertit en énergie électrique.

**II.1.4.Applications des turbines à vapeur : [8]**

Les turbines à vapeur font partie de diverses industries, de moyenne à grande échelle, et comprennent des dizaines d'applications institutionnelles.

L'un des applications les plus populaires d'une turbine à vapeur dans l'industrie est :

**-La Centrale électrique à cycle combiné :**

Les turbines à vapeur permettent aux centrales de produire de l'électricité à partir d'une turbine à gaz et d'utiliser le gaz et la chaleur produite dans le processus pour générer de la vapeur qui, à son tour, produit de l'énergie supplémentaire. Les centrales à cycle combiné soutenues par des turbines à vapeur sont capables de produire ou d'atteindre des rendements de production d'électricité supérieurs à 50% et sont utilisées dans les grandes applications industrielles.

Aux États-Unis, la majeure partie de l'électricité est produite à l'aide de moteurs à turbine à vapeur. Offrant des rendements plus élevés, des coûts bas et un impact positif sur l'environnement, les turbines à vapeur font désormais partie intégrante de plusieurs industries américaines.

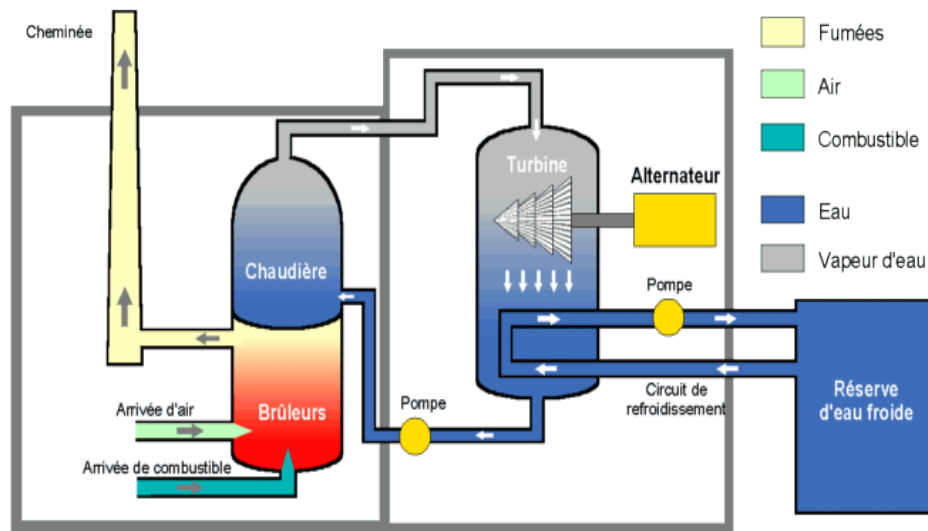


Figure II.2: Représentation schématique d'une installation motrice à vapeur

### II.1.5. Classification des turbines à vapeur : [9]

Les turbines à vapeur peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leur construction, du processus permettant d'obtenir la perte de chaleur, des conditions initiales et finales de la vapeur utilisée et de leur utilisation industrielle, comme suit:

#### A. Selon le nombre d'étages de pression :

- Turbines à un étage avec un ou plusieurs étages de vitesse, généralement de petites puissances, principalement utilisées pour l'entraînement de compresseurs centrifuges, de soufflantes et d'autres machines similaires.
- Turbines à plusieurs étages à impulsion et à réaction, fabriquées dans une vaste gamme de puissances allant de petites à grandes.

#### B. Selon le sens du flux de vapeur :

- Turbines axiales, dans lesquelles la vapeur s'écoule dans une direction parallèle à l'axe de la turbine.
- Turbines radiales, dans lesquelles la vapeur circule dans une direction perpendiculaire à l'axe de la turbine.

#### C. Selon le nombre de cylindres :

- Turbines à un seul cylindre
- Turbines à plusieurs cylindres (2, 3 et 4 cylindres), qui peuvent avoir un seul arbre, c'est-à-dire des rotors montés du même arbre, ou multiaxiales, ayant un arbre de rotor séparé et ayant leur cylindres placés parallèlement les uns aux autres.

**D. Selon la méthode de régulation :**

- Turbines à régulation de tuyère.
- Turbines avec dérivation dans lesquelles la vapeur, en plus d'être acheminée vers le premier étage, est également directement entraînée vers un, deux ou même trois étages intermédiaires de la turbine.

**E. Selon le principe d'action de la vapeur :**

- Turbines à impulsion.
- Turbines à réaction axiale.
- Turbines à réaction radiale sans pales de guidage stationnaires.
- Turbines à réaction radiale à aubes fixes.

**F. Selon le processus de chute de chaleur :**

- Turbines à condensation avec vapeur d'échappement introduites dans le condenseur avec des régénérateurs.
- Turbines à condensation avec extraction à un ou deux étages à des pressions spécifiques pour des applications industrielles et de chauffage.
- Turbines à contre-pression dont la vapeur d'échappement est utilisée à des fins industrielles et de chauffage.
- Turbines à contre-pression avec extraction de la vapeur à partir d'étapes intermédiaires à des pressions spécifiques.
- Mixed - pression avec deux ou trois extractions sous pression avec apport de vapeur d'échappement à ses étages intermédiaires.

**G. Selon les conditions de vapeur à l'entrée :**

- Turbines à basse pression utilisant des pressions de 1,2 à 2 bars.
- Turbines à moyenne pression utilisant de la vapeur à une pression pouvant atteindre 4,0 bars.
- Turbines à haute pression utilisant de la vapeur à plus de 40 bars.

**H. Selon leur utilisation dans l'industrie :**

- Turbines fixes à vitesse de rotation constante principalement utilisées pour entraîner des alternateurs.
- Turbines fixes à vitesses variables destinées à l'entraînement de turbosoufflantes, de circulateurs d'air, de pompes, etc.

### II.1.6 .Cycle de Rankine :

Le cycle de Rankine est un cycle théorique qui convertit l'énergie thermique en travail. Développé par William John Macquorn Rankine au 19ème siècle, il a été largement utilisé pour les machines à vapeur. Actuellement, le cycle Rankine est utilisé dans les centrales électriques et produit 90% de l'électricité mondiale. [9]

Dans ces cycles, on utilise un fluide condensable qui est refroidi à une pression et une température suffisantes pour qu'il soit entièrement liquéfié avant compression. Dans ces conditions, le travail de compression devient quasiment négligeable devant le travail de détente (alors qu'il en représente environ 60 % dans une turbine à gaz). Le liquide comprimé est vaporisé et éventuellement surchauffé dans la chaudière par échange thermique avec la source chaude, puis détendu et condensé. L'état diphasique du fluide lors des phases de condensation et de vaporisation est très favorable pour les échanges de chaleur. S'il n'y a pas de surchauffe, on parle de cycle de Rankine, et s'il y en a une, de cycle de Hirn.

Le schéma de principe d'un cycle organique de Rankine simple est donné par la figure ci-dessous. Il montre qu'une telle installation comprend quatre composants, traversés par le même débit de fluide :

- une pompe.
- un générateur de vapeur.
- une machine de détente.
- et un condenseur. [8]

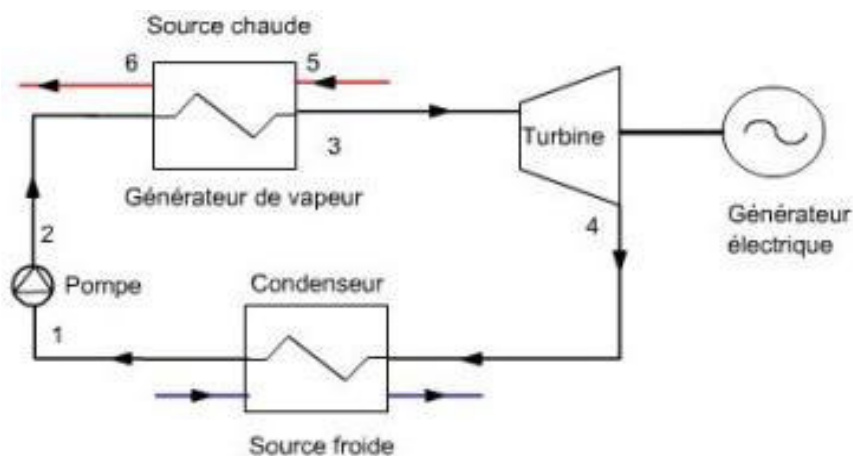


Figure II.3:schéma de principe d'un cycle de Rankine



Le cycle, parcouru dans le sens moteur, est composé des quatre transformations suivantes :

- 1→2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique).
- 2→3 : Vaporisation isobare et irréversible.
- 3→4 : Détente adiabatique et réversible (isentropique).
- 4→1 : Liquéfaction isobare et irréversible.

L'évaporation isobare du fluide peut être divisée en deux étapes successives : chauffage du liquide de façon isobare uniquement puis évaporation isobare et isotherme.

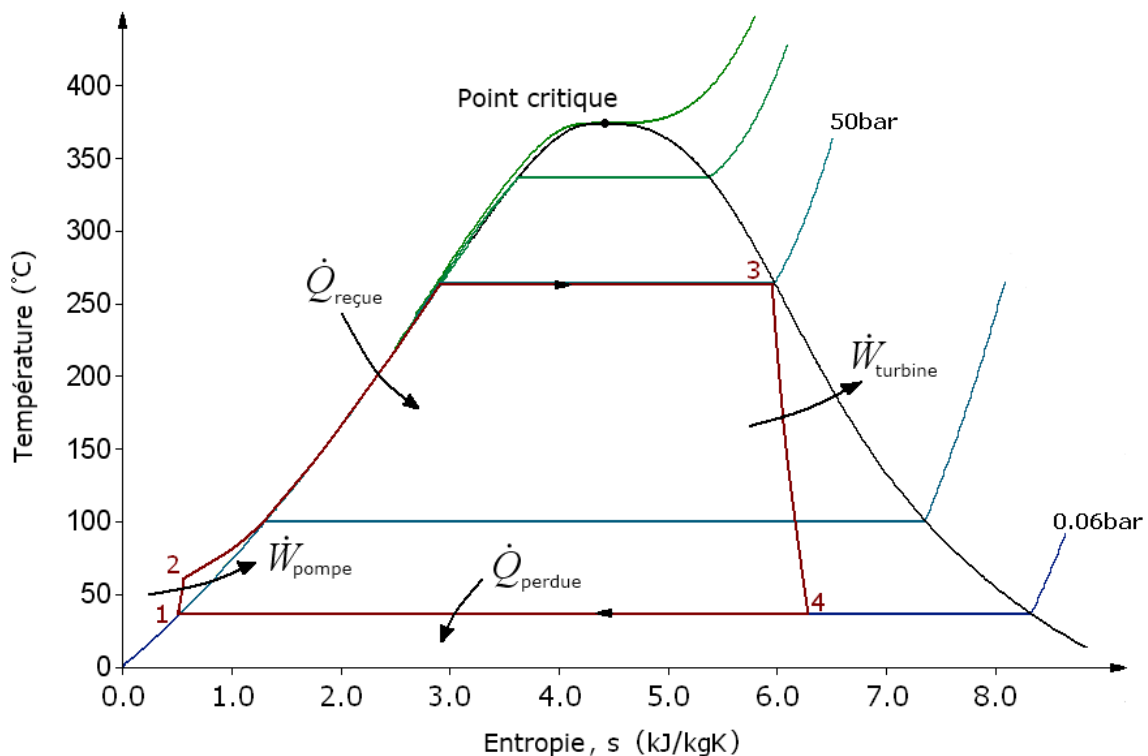


Figure II.4:diagramme (T-S) de cycle de Rankine

Le rendement d'une machine fonctionnant selon ce cycle est le rendement de Carnot donné par :

$$\eta_{th} = \frac{-w_{t12} - w_{t34}}{q_{41}} = \frac{t_M - t_m}{t_M}$$

### II.1.7.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. [11]

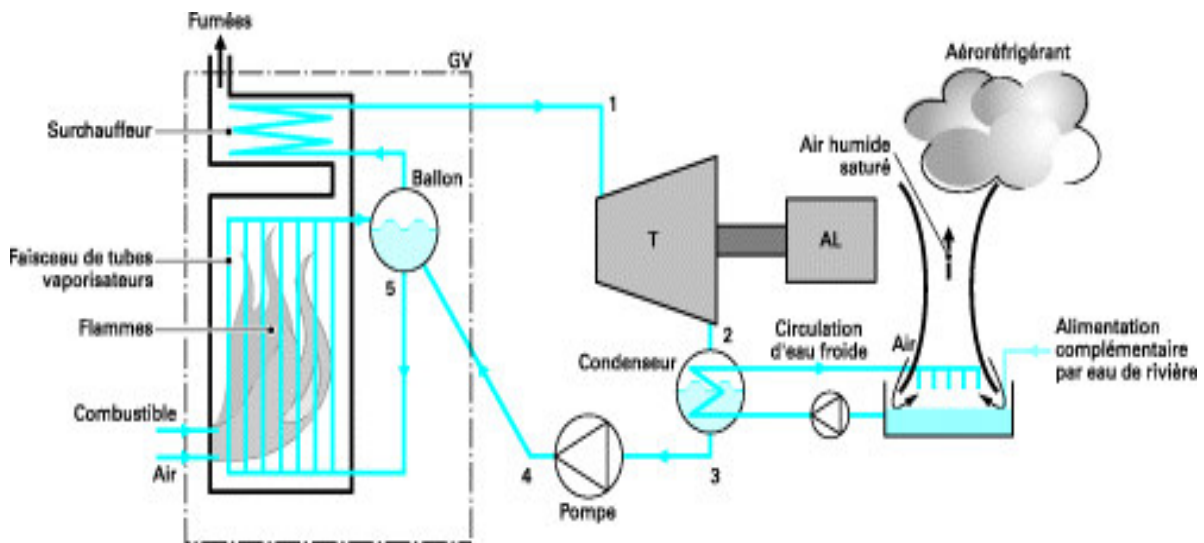


Figure II.5: installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn.

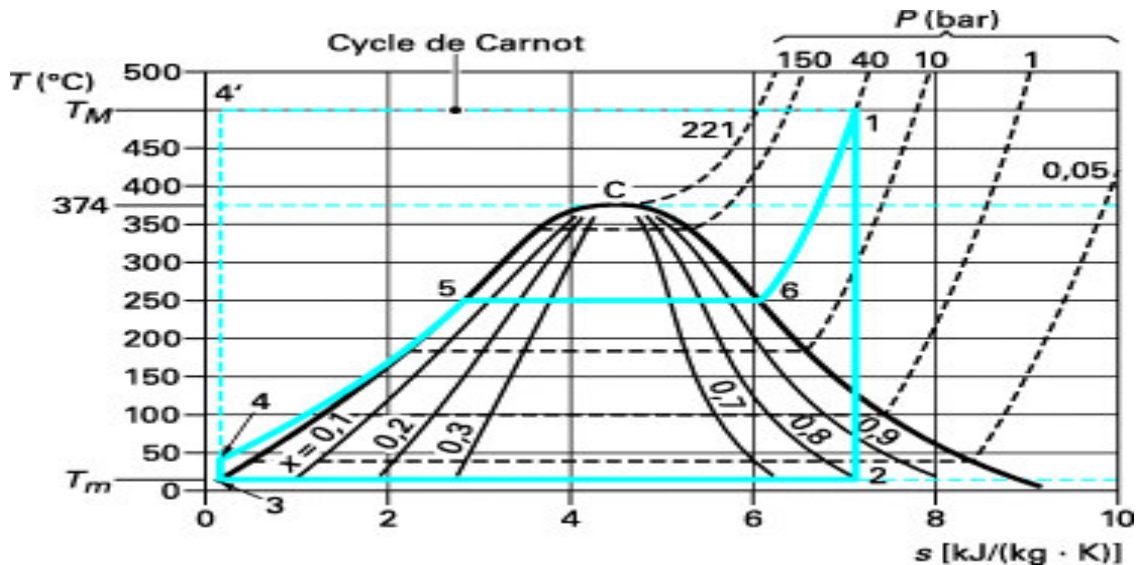


Figure II.6 : Cycle de Hirn

### ➤ Expressions du rendement théorique

Pour ce type de cycles, le rendement théorique  $\eta_{th}$  est calculé à partir des valeurs des Enthalpies massiques  $h$  de l'eau aux divers points caractéristiques du cycle.

Ainsi, on notera que :

$$\eta_{th} = \frac{-w_{t12} - w_{t34}}{q_{41}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

### II.1.8.Cycle de Hirn avec resurchauffe :

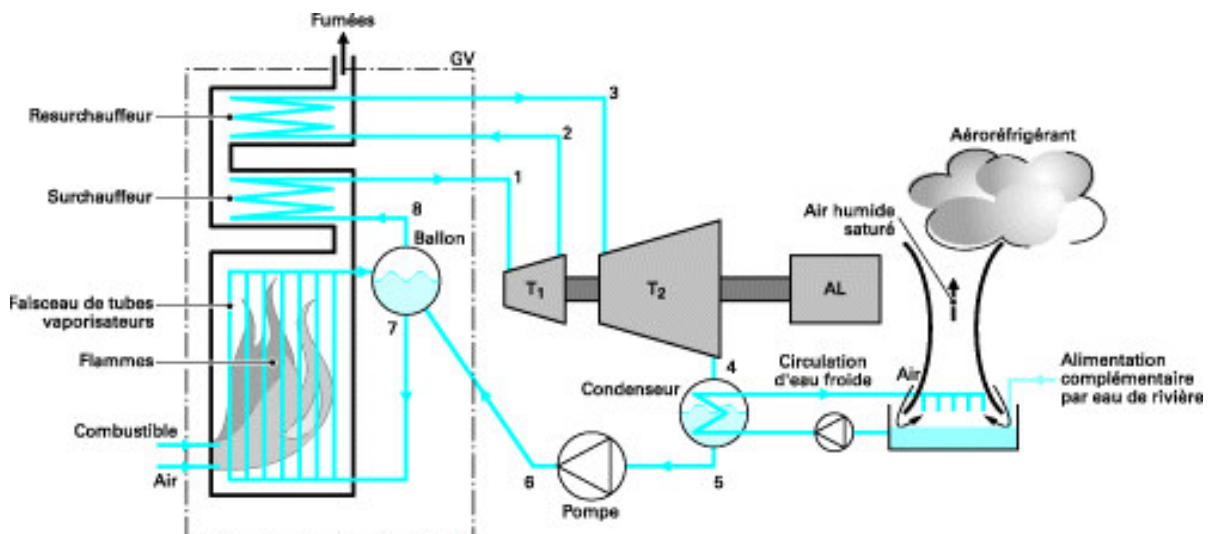


Figure II.7: Schéma d'une IMV fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn avec surchauffe

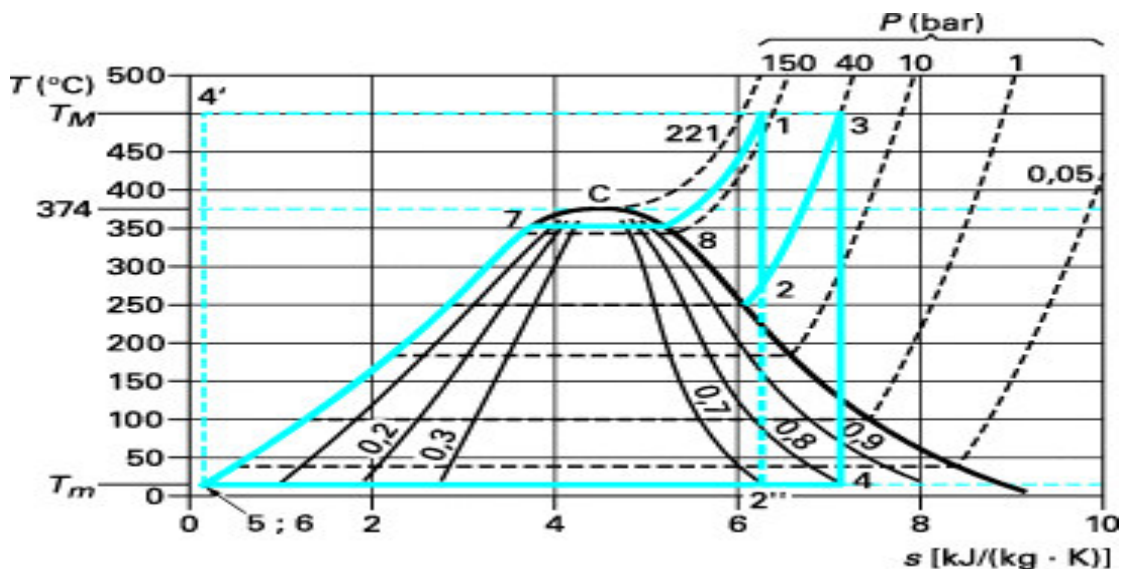


Figure II.8 : Cycle de Hirn à resurchauffe.

Le rendement théorique du cycle de Hirn a resurchauffe est donné par :

$$\eta_{th} = \frac{-wt_{12}+wt_{34}+wt_{56}}{q_{61}+q_{23}} = \frac{-\Delta h_{12}+\Delta h_{34}+\Delta h_{56}}{\Delta h_{61}+\Delta h_{23}} = \frac{(h_1-h_2)-(h_3-h_4)}{(h_1-h_5)+(h_3-h_2)}$$

Le rendement théorique de ce cycle peut arriver à **46%**.

### II.1.9. Cycle supercritique

Pour améliorer le rendement des centrales électrogènes, on tend à utiliser des cycles Supercritiques, c'est-à-dire des cycles dans lesquels le réchauffage de l'eau a lieu à une Pression supérieure à la pression critique, soit supérieure à 221 bars. Il n'y a plus alors de Palier de changement de phase liquide/vapeur, mais une évolution progressive du liquide Vers le gaz, comme on peut le voir sur la **figure (II.9)**

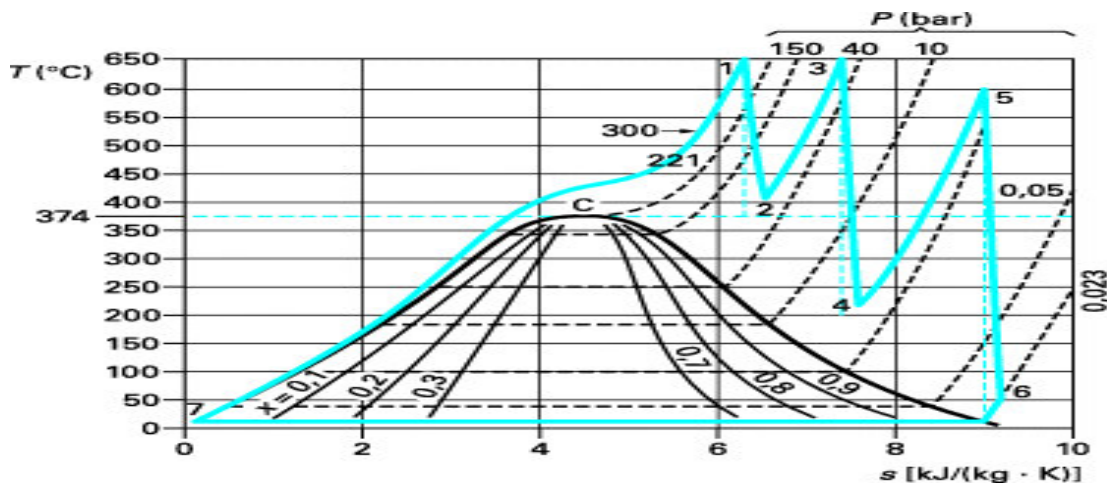


Figure II.9: IMV à cycle supercritique à deux resurchauffes.

## II.2. Turbine à gaz

### II.2.1. Définition : [12]

La turbine à gaz est devenue aujourd'hui le moyen le plus important de production d'énergie électrique avec une unité compacte.

La turbine à gaz est une machine thermique à flux continue, réalisent différentes transformations thermodynamiques, dans une succession d'organes comportant un compresseur, une turbine couplée mécaniquement sur un arbre, et une chambre de combustion intercalée entre ces deux dernies. Ce qui permet de transformer l'énergie contenu dans le combustible en énergie mécanique utilisable sur l'arbre de la turbine (machines industriels) ou sous forme d'énergie propulsive dans un jet (turboréacteur). Dans son architecture la plus simple, la turbine a gaz, qui aspire l'air ambiant et rejette des gaz brulés a l'atmosphère, fonctionne en circuit ouvert.

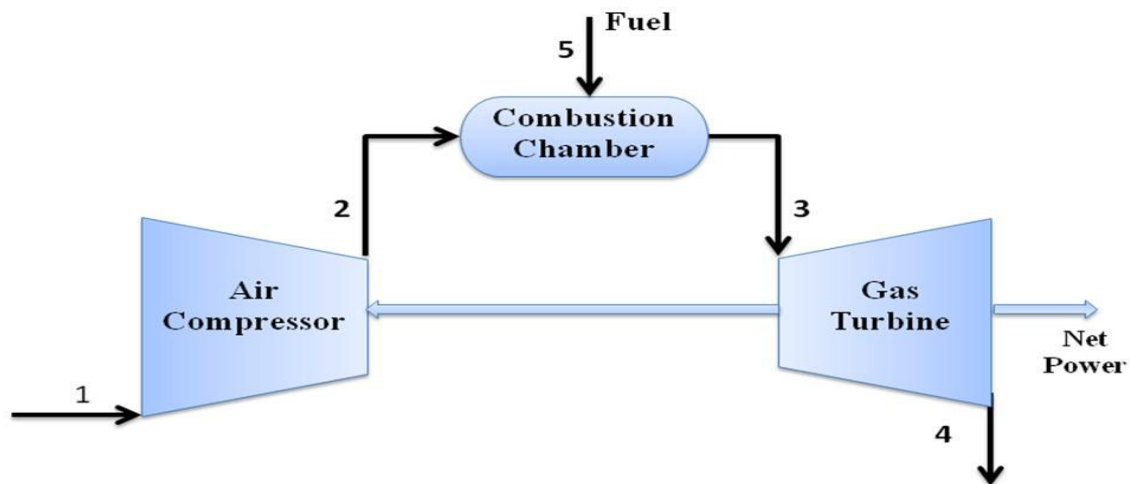


Figure II.10 schéma d'une turbine à gaz

### II.2.2.Historique : [13]

La turbine à gaz a été inventée en 1791 par le Britannique John Barber. Sa supériorité technique et économique par rapport aux machines à vapeur à piston a été reconnue dès le 19<sup>ème</sup> siècle. Toutefois l'insuffisance des connaissances sur les matériaux interdisait à l'époque de concrétiser les espoirs placés en elle. Il a en effet fallu attendre 1904 pour que Franz Stolze développe à Berlin une turbine à gaz capable de fonctionner, mais ne délivrant encore aucune puissance utile. La première turbine à gaz pratique utilisée pour produire de l'électricité fonctionna à Neuchâtel (Suisse) en 1939 et fut développée par la société Brown Boveri.

Une étape importante dans la réalisation industrielle de la turbine à gaz a été constituée par la turbine d'Armengaud et Lemale, construite par la société des Turbomoteurs à Paris (1905) qui permet pour la première fois l'entraînement de son compresseur.

### II.2.3.Les éléments d'une turbine à gaz :

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois principaux éléments:

- ✓ **Un compresseur**, centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ.

- ✓ **Une chambre de combustion**, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement.
- ✓ **Une turbine**, généralement axial, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.

#### II.2.4.Principe de fonctionnement :

La turbine à combustion est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu.

Dans sa forme la plus simple, la turbine à combustion fonctionne selon le cycle dit

De **Joule** comprenant successivement et schématiquement :

- une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique ;
- un chauffage isobare ;
- une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique ;
- un refroidissement isobare.

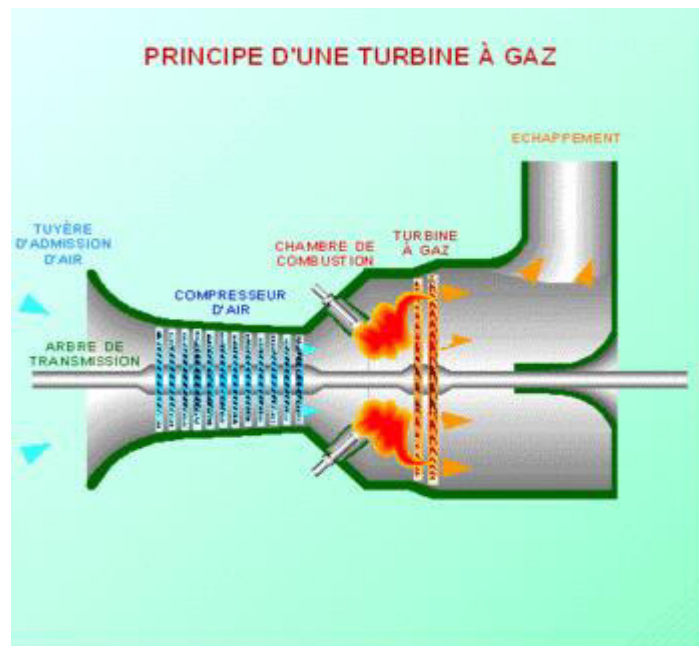


Figure II.11 principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

**II.2.5. Classification des turbines à gaz : [14]**

Les installations à turbine à gaz peuvent être classées en fonction des facteurs suivants :

**1. Combustion:**

Turbine à gaz à combustion continue ou à pression constante et à combustion de type explosif ou à volume constant.

**2. Cycle thermodynamique (puissance du gaz):**

Cycle de Brayton ou Joule (pour les turbines à gaz à volume constant), cycle d'Atkinson (pour les turbines à gaz à volume constant) et cycle Ericsson (pour la turbine à gaz à pression constante avec un grand nombre de refroidissement intermédiaire et de réchauffage.)

**3. Cycle de fonctionnement:**

Turbine à gaz à cycle ouvert, cycle fermé ou cycle semi-fermé.

Une turbine à gaz à combustion continue (pression constante) peut fonctionner avec un cycle ouvert ou fermé.

La turbine à gaz à volume constant fonctionne avec un cycle ouvert.

Une turbine à gaz à cycle fermé est un moteur à combustion externe, tandis qu'une turbine à gaz à cycle ouvert est un moteur à combustion interne.

**4. Arrangement des arbres :**

Turbines à gaz à un seul arbre (le compresseur est actionné par une turbine), turbines à gaz à plusieurs arbres (turbine à compresseur et turbine de puissance séparées), turbines à gaz à flux série et turbines à gaz à flux parallèles, etc.

**5. Combustible :**

Turbine à combustible solide, turbine à combustible gazeux.

**6. Application:**

Turbine à gaz fixe, automobile, locomotive, marine et aéronautique.

**II.2.6. Les types de turbine à gaz : [15]**

Il existe deux types de turbines à gaz, qui sont utilisées dans la centrale à turbine à gaz.

**➤ Turbine à haute pression :**

Au début, l'arbre du compresseur fonctionne à l'aide du moteur de démarrage. Grâce à la turbine à haute pression, les gaz brûlés sont dilatés. L'arbre du compresseur est couplé à l'arbre de la turbine car il entraîne l'arbre du compresseur. A l'aide de la turbine haute pression, le moteur de démarrage et le compresseur sont arrêtés. Dans la puissance



développée, 66% de la puissance est utilisée pour faire fonctionner le compresseur et la puissance restante, soit 34%, est utilisée pour générer de l'énergie électrique.

➤ **Turbine Basse Pression :**

L'objectif principal de la turbine à basse pression est de produire de l'énergie électrique. L'arbre de la turbine basse pression est couplé avec le générateur. Les gaz brûlés sont libérés par la turbine à haute pression. Les gaz brûlés libérés entrent dans la chambre de combustion. Ensuite, ils se dirigent vers la turbine basse pression. Après la séparation, les gaz chauds d'échappement de la turbine basse pression passe à travers le générateur pour évacuer l'air par le dessus de la cheminée. La chaleur dégagée par les gaz chauds est recyclée pour préchauffer l'air sortant de la chambre haute pression avant qu'il ne pénètre dans la chambre de combustion.

### **II.2.7.Cycles thermodynamique : [16]**

➤ **Le cycle de Brayton :**

Le cycle idéal pour les moteurs à turbine à gaz, pour commencer, il est conseillé de connaître un bref aperçu du cycle théorique de la turbine à gaz, appelé «cycle de Brayton».

Le cycle de Brayton a été proposé pour la première fois par George Brayton dans le moteur alternatif à huile qu'il a développé vers 1870. Aujourd'hui, il est utilisé pour les turbines à gaz uniquement lorsque les processus de compression et de détente sont appliqués aux machines tournantes. Le cycle idéal que subit le fluide de travail dans cette boucle fermée est le cycle de Brayton, constitué de quatre processus réversibles en interne (Fig. II.12.):

1-2 Compression isentropique (dans un compresseur).

2-3 Apport de chaleur à pression constante.

3-4 Expansion isentropique (dans une turbine).

4-1 Rejet de chaleur à pression constante.



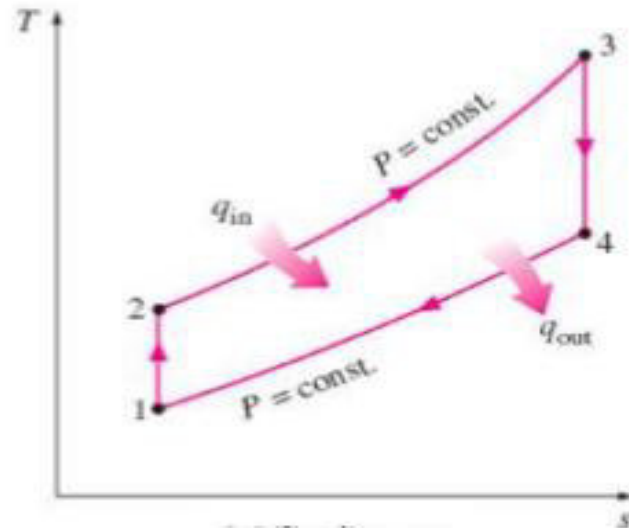


Figure II.12 Diagramme T-S de cycle Brayton idéal

➤ **Le cycle réel :**

Le cycle de Brayton est le cycle que les ingénieurs et les chercheurs en font la référence à comparer et à essayer d'atteindre. En réalité, la turbine à gaz ne fonctionne pas comme le cycle de Brayton idéal. Le cycle réel se différencie du cycle idéal de la manière suivante :

- La compression est adiabatique, de rendement isentropique  $\eta_c$  : en raison des travaux de frottement, la température réelle est plus élevée que la température théorique, et la transformation de compression n'est plus isentropique 1-2a mais 1-2, tel que  $T_{2a} > T_2$ .
- La détente dans la turbine est adiabatique, de rendement isentropique  $\eta_d$  : en raison des travaux de frottement, la transformation de la détente ne s'effectue pas suivant un arc d'isentropique, mais suivant un arc tel que  $T_{4a} > T_4$ .

Le diagramme en T-S pour le cycle de Brayton réel ou non idéal deviendra comme indiqué ci-dessous (Fig. II.13)

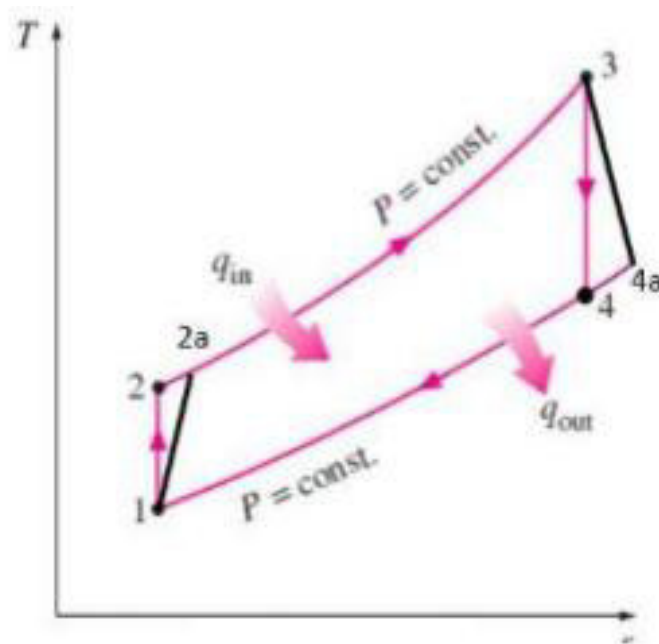


Figure II.13 Diagramme T-S de cycle Brayton réel

## II.3.Cycle combiné :

### II.3.1.Introduction : [17]

Les centrales électriques à cycle combiné sont la technologie de choix pour la production d'énergie à échelle d'utilité, flexible.

En dehors de la grande efficacité par rapport aux centrales à vapeur traditionnelles, les centrales à cycle combiné offrent des avantages significatifs en termes d'impact environnemental relativement faible, de niveau élevé de flexibilité opérationnelle et de temps plus court de mise en œuvre du projet.

### II.3.2.Définition : [18]

Un cycle combiné est la juxtaposition de deux ou plusieurs cycles thermodynamiques destinés à convertir plus efficacement l'énergie fournie en travail en adaptant deux ou plusieurs fluides de cycle. Avec le développement de la turbine à gaz, le terme «cycle combiné» se réfère plus spécialement à un système composé d'une turbine à gaz, d'un récupérateur de chaleur, générateur de vapeur, et d'une turbine à vapeur.

L'idée qui a conduit à l'innovation des centrales à cycle combiné gaz turbine était d'observer que les gaz à la sortie de la turbine à gaz étaient encore suffisamment chauds (600°C environ) pour pouvoir transmettre leur chaleur à un circuit indépendant. Un échangeur de chaleur

permet ainsi de récupérer la chaleur de ces gaz dans un circuit faisant tourner une turbine à vapeur. La chaleur issue de la combustion du gaz est donc utilisée au maximum afin d'augmenter l'efficacité énergétique. Il est d'autant plus rentable que le coût de l'énergie est élevé.

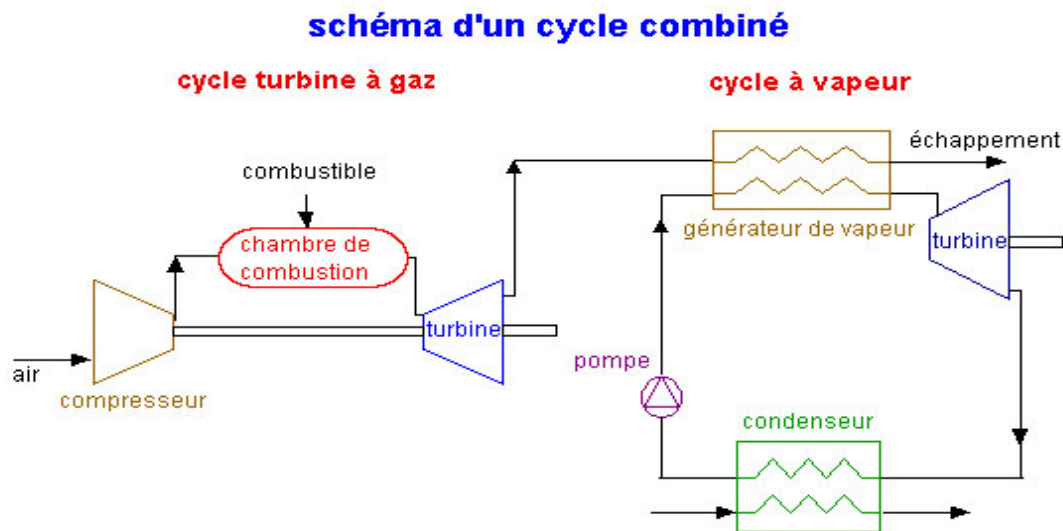


Figure II.14: Schéma simplifié d'un cycle combiné

### II.3.3.historique :[19]

Depuis les chocs pétroliers de 1974 et 1979, il devient rentable d'avoir des installations compliquées et chères pour améliorer le rendement des centrales. C'est le but des cycles combinés.

Lorsque les premières turbines à gaz ont été installées aux États-Unis, elles étaient principalement utilisées comme entraînements mécaniques ou comme unités de pointe. En même temps, on s'aperçut que la performance d'une installation à turbine à gaz peut être améliorée en utilisant la chaleur sensible de la turbine à gaz (les gaz d'échappement) dans un système de récupération de chaleur. Tel système peut fournir de la chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur pour soit une centrale à cycle combiné et / ou une cogénération.

-La première turbine à gaz Westinghouse d'une puissance nominale de 1340 kW est entrée en service en 1949.

-Première centrale à cycle combiné Application du chauffage de l'eau d'alimentation 1949

-Premier générateur de vapeur à récupération de chaleur pour une turbine à gaz 1957

- Première chaudière entièrement cuite Centrale électrique à cycle combiné 1965
- Première centrale à cycle combiné avec générateur de vapeur à récupération de chaleur 1968
- Première gazéification du charbon Centrale électrique à cycle combiné 1972
- Première centrale à cycle combiné avec une turbine à gaz perfectionnée 1990

#### **II.3.4.Principe de fonctionnement :[20]**

C'est ainsi qu'une centrale à cycle combiné fonctionne pour produire de l'électricité et capter la chaleur perdue de la turbine à gaz, afin d'accroître le rendement et la production d'électricité.

- Le gaz est injecté par les brûleurs dans la chambre de combustion, en même temps que de l'air ambiant, aspiré par le compresseur. Le mélange gazeux s'enflamme.
- Dans la chambre de combustion le volume de gaz de combustion augmente considérablement, et ceux-ci peuvent actionner les pales de la turbine à gaz.
- Les gaz de d'échappement quittent la turbine à gaz à une très haute température. Ils sont donc dirigés vers une chaudière de récupération, ou ils convertissent en vapeur d'eau qui circule dans les tubes.
- La turbine à gaz est actionnée par la pression des gaz brûlés.
- La turbine à vapeur est actionnée par la vapeur qui se détend progressivement. Cette vapeur est restituée après usage, soit directement à la source, soit dirigée vers une tour de refroidissement.
- Chaque turbine actionne un alternateur qui produit de l'électricité. Le rendement énergétique de la centrale à cycle combiné se situe aux environs de 55%.

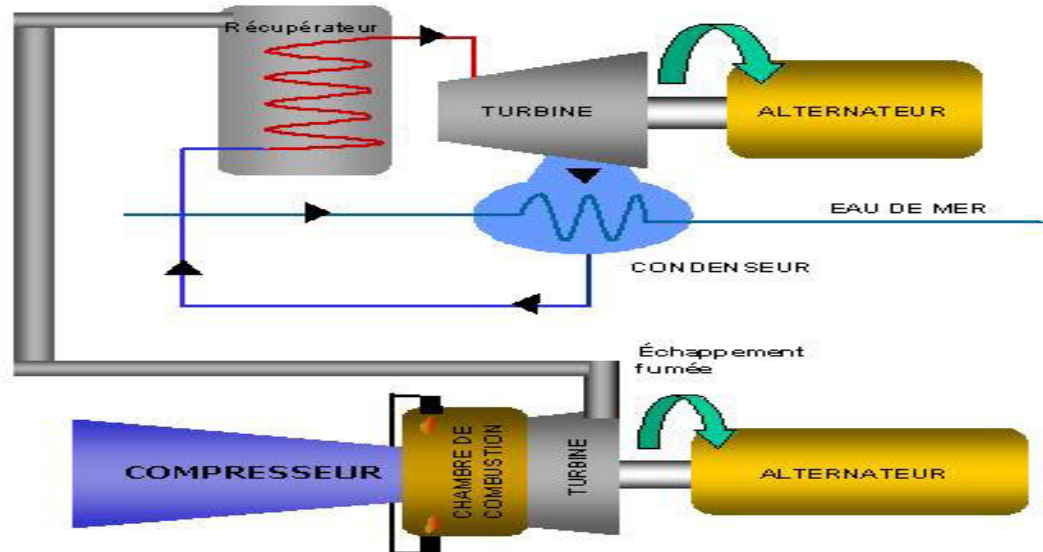


Figure II.15: Principe de fonctionnement d'un cycle combiné

### II.3.5. Les types d'installation de cycle combiné : [21]

#### -Singal shaft :

Le système à cycle combiné comprend des configurations mono-arbre et multi-arbres. Le système à arbre unique comprend une turbine à gaz, une turbine à vapeur, un générateur et un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG), la turbine à gaz et la turbine à vapeur étant couplées au générateur unique sur un seul arbre.

#### -Multi shaft :

Les systèmes multi-arbres ont un ou plusieurs générateurs à turbine à gaz et HRSG qui fournissent de la vapeur via un collecteur commun à un seul générateur à turbine à vapeur. En termes d'investissement global, les coûts d'un système multi-arbres sont environ 5% plus élevés.

Le principal inconvénient des centrales à cycle combiné à plusieurs étages est que le nombre de turbines à vapeur, de condenseurs et de systèmes de condensation, et peut-être même de tours de refroidissement et de systèmes de circulation d'eau, augmente pour correspondre au nombre de turbines à gaz.

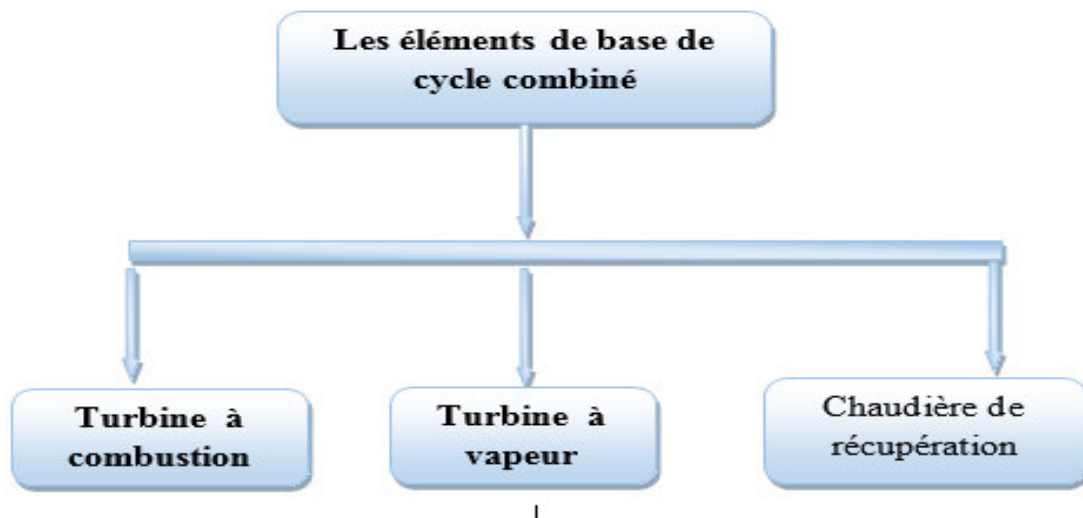
**II.3.6. Les éléments de base de cycle combiné :**

Figure II.16: les éléments de base de cycle combiné

**II.3.7. La chaudière de récupération :[22]**

Il existe deux grands groupes de chaudières : les chaudières de récupération qui permettent de valoriser l'énergie thermique d'un fluide chaud qui doit être refroidi et les chaudières à Combustion, dans lesquelles un combustible est brûlé de manière à transférer l'énergie nécessaire.

La chaudière de récupération HRSG (*heat recovery steam generator*) est un échangeur de chaleur qui permet de récupérer l'énergie thermique d'un écoulement de gaz chaud. Elle produit de la vapeur qui peut être utilisée dans un procédé industriel ou pour alimenter une turbine à vapeur.

La chaudière de récupération est aussi un composant important des centrales à cogénération. Les chaudières de récupération sont un assemblage d'échangeurs dont le nombre et l'arrangement dépendent de la puissance à transmettre. Indépendamment de la configuration de la chaudière, on distingue deux catégories en fonction de l'arrangement des échangeurs et le nombre de pression.

Le choix du nombre de niveaux de pression est une conséquence directe de la turbine à combustion qui a été retenue en amont. Le nombre des niveaux de pression est relativement aisé à deviner sur une installation, il suffit de compter le nombre de ballons dont dispose la

chaudière. Les flux massiques et thermiques des fumées guident cette option. Les dénominations usuelles sont :

- ☐ ☐ Chaudière à un niveau (1p)
- ☐ ☐ Chaudière à deux niveaux (2p)
- ☐ ☐ Chaudière à trois niveaux (3p)
- ☐ ☐ Chaudière avec ou sans resurchauffe (RH), avec ou sans postcombustion.

IL est possible d'associer ces configurations avec des valeurs thermodynamique de références pour chaque cas (tableau I.1).

| Chaudière                                                  | Caractéristiques de la vapeur |                         |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
|                                                            | Pression (bar)                | Température (°C)        |
| 1p                                                         | 55                            | 500                     |
| 2p                                                         | HP/BP 75/6                    | HP/BP 500/200           |
| 3p et 3p+RH                                                | HP/MP/BP 110/30/5             | HP/MP/BP<br>550/550/200 |
| Chaudière en phase de développement                        | HP 180                        | /                       |
| HP/MP/BP : haute pression/moyenne pression/basse pression. |                               |                         |

**Tableau II.1 : Valeurs thermodynamiques des configurations usuelles des chaudières.**

### II.3.8.Rôle de la chaudière de récupération :

La chaudière est totalement de rôle de transmettre l'énergie apparaissant sous forme de la chaleur a de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression , soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique devenant de la vapeur par détente . De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en générale associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique.

Dans un cycle combiné les chaudières de récupération doivent être données de façon à satisfaire à plusieurs objectifs

- diminuer les irréversibilités.
- accroître l'efficacité du transfert de chaleur.
- Minimiser la perte par enthalpie restante de la fumée rejetée à la cheminée.

-admettre le rajustement de la température de sortie de la vapeur surchauffée à l'entrée de la turbine à vapeur.

-pouvoir être précipitamment démarrée pour ne pas perturber le cycle combiné.

Afin de rencontrer ces buts, certaines méthodes sont régulièrement utilisées :

\*Déterminer les niveaux de pression et organiser la circulation générale de façon à minimiser la différence de température entre les fumées et l'eau/vapeur à réchauffer.

\*Designer pour chaque échangeur la circulation à contre-courant.

\*User un réchauffeur d'air quand le cycle le permet (pas de turbine à gaz).

### II.3.9. Classification des chaudières de récupération : [23]

Il existe plusieurs manières pour classer les chaudières de récupération :

#### ➤ Selon la circulation de L'eau ou vapeur :

##### a) Les chaudières à circulation naturelle

Dans les chaudières à circulation naturelle, la circulation du fluide dans l'évaporateur est assurée par la différence de densité entre l'eau qui descend du ballon et le mélange eau vapeur qui remonte vers le ballon. La circulation naturelle est d'autant meilleure que la différence de hauteur entre le ballon et les tubes est grande. Dans le ballon, Il y a séparation des phases : la phase vapeur est envoyée vers une éventuelle surchauffe tandis que l'eau au bas du ballon est renvoyée vers l'évaporateur.

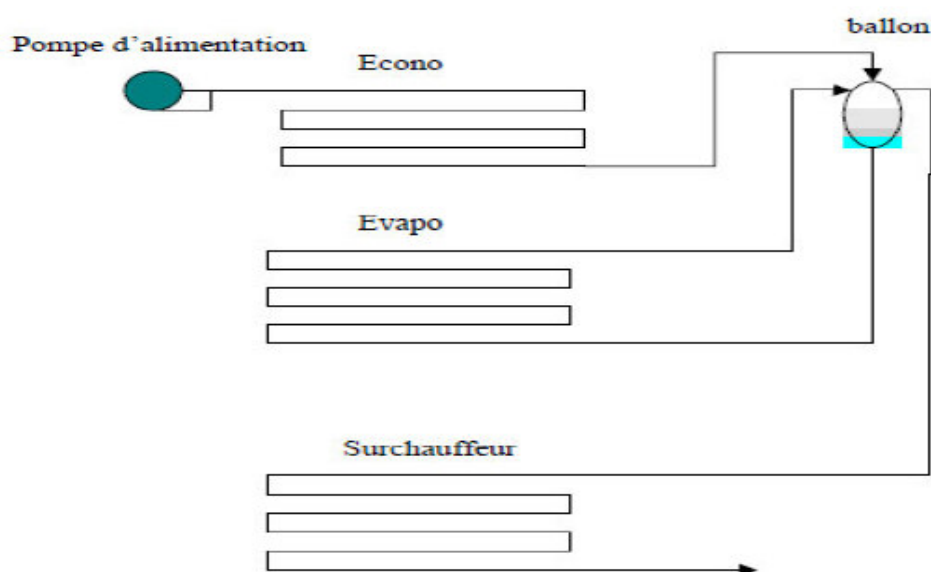


Figure II.17: Chaudière à circulation naturelle.



**b) Les chaudières à circulation assistée**

la différence de masse volumique entre l'eau liquide et l'eau vapeur devient faible. Certains constructeurs ont placés des pompes de circulation assistée en partie basse de jambe froide. Cette disposition permet de baisser le taux de circulation. Le débit d'eau en circulation est donc réduit, ce qui permet de diminuer le volume de la chaudière et le diamètre des tubes écran. Le temps de démarrage de l'installation est également réduit par rapport à une chaudière à circulation naturelle car la masse de métal à réchauffer est moindre et qu'il n'y a pas à attendre la formation du thermosiphon. Par contre ces pompes représentent un coût d'investissement et de maintenance. Elles sont fragiles dans le cas le moteur électrique est noyé.

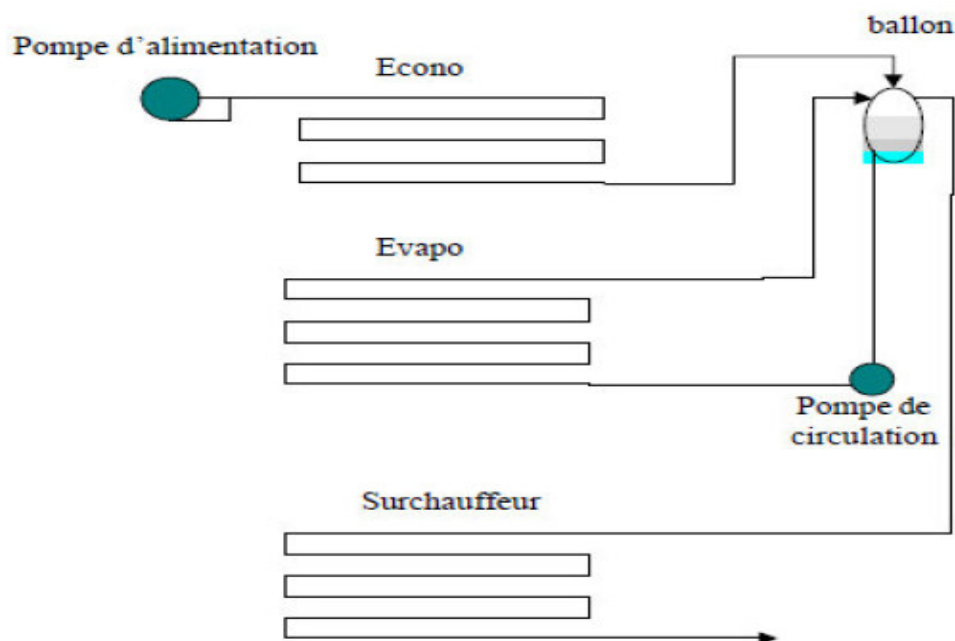


Figure II.18 : Chaudière à circulation assistée.

**c) Les chaudières à circulation forcée**

Les chaudières les plus modernes peuvent être à vaporisation totale (once-through boiler en Anglais): elles ne comportent théoriquement plus de réservoir matérialisant la séparation eau vapeur (voir Figure I.19) et sont constituées d'un grand nombre de tubes parallèles à l'intérieur des quels l'eau se réchauffe, se vaporise, et se surchauffe en un seul passage. Une chaudière à circulation forcée diffère d'une chaudière classique, à circulation naturelle ou assistée, de par le nombre d'éléments qui la composent. En effet, une chaudière classique comprend un économiseur, un vaporiseur avec ballon de séparation et un surchauffeur. Dans une chaudière à circulation forcée, on ne peut plus faire la différence entre l'économiseur et

le vaporiseur, et s'il subsiste un ballon de séparation, non seulement sa taille est fortement réduite, mais en plus, son utilité est principalement limitée à la phase de démarrage de la chaudière, pendant laquelle l'eau soutirée à la base du ballon est renvoyée vers le dégazeur, le surchauffeur n'étant opérationnel que lorsque le débit de vapeur sortant du ballon est suffisant.

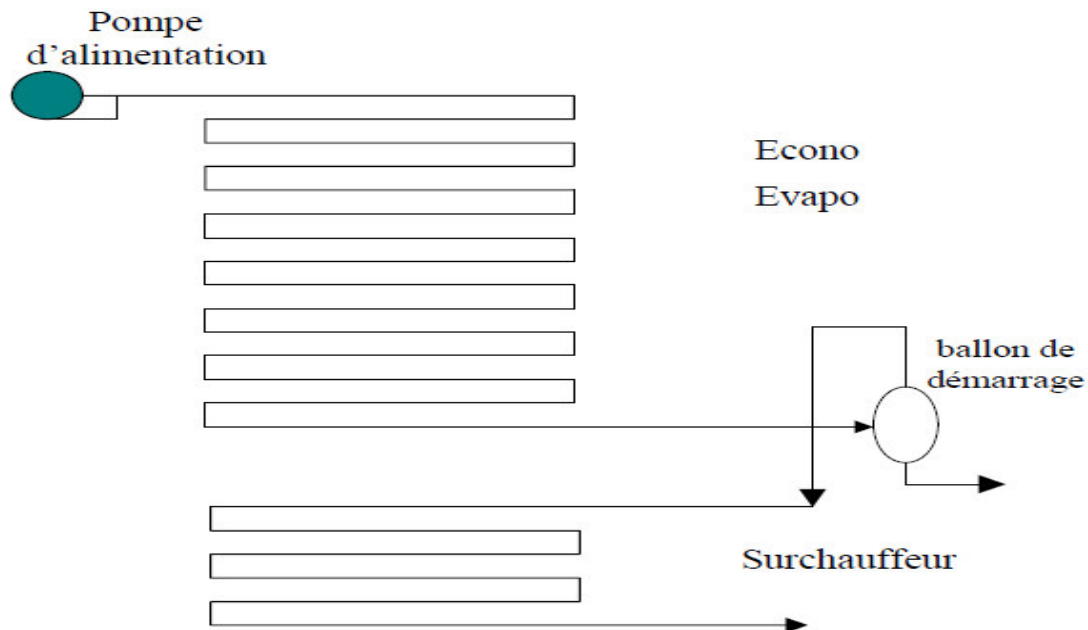


Figure II.19 : Chaudière à circulation forcée avec ballon

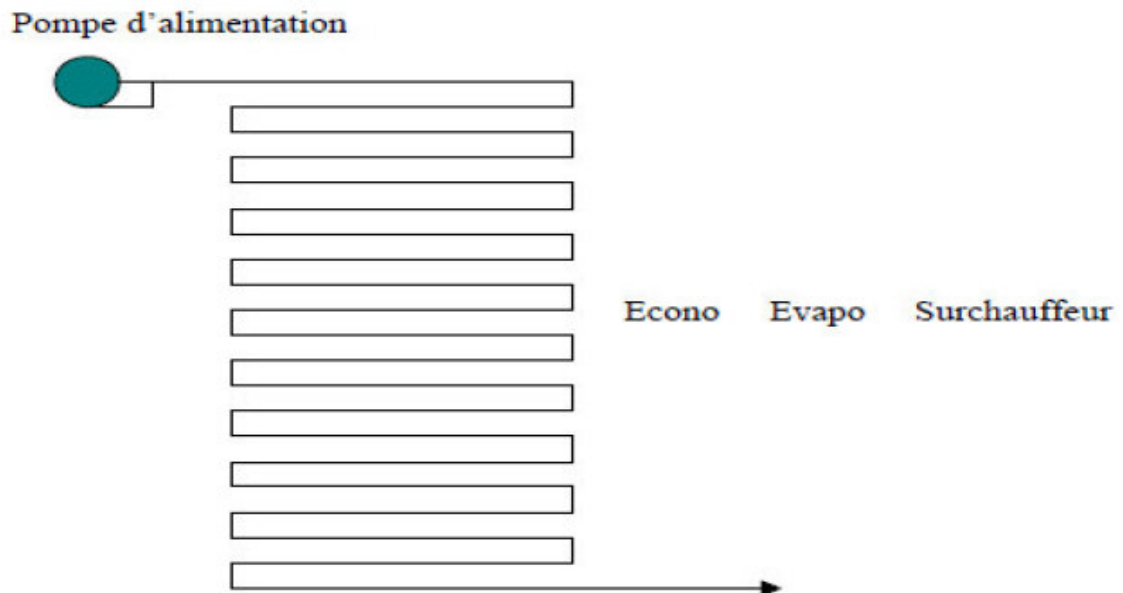


Figure II.20 : Chaudière à circulation forcée sans ballon de démarrage

➤ **Selon la post combustion :**

- \_ Avec post de combustion.
- \_ Sans post de combustion.

➤ **Selon le niveau de pression :**

**a) Chaudière à un niveau de pression (1p) :** dans une chaudière de récupération (horizontale ou verticale), les gaz d'échappement d'une turbine à combustion rencontrent successivement :

- \_ **Le surchauffeur :** la vapeur provenant du ballon à l'état saturé est surchauffée.
- \_ **L'évaporateur :** c'est le seul échangeur du dispositif qui n'élève pas la température de vapeur
- \_ **L'économiseur :** son but de réchauffer l'eau d'alimentation jusqu'à une température proche de la température de saturation, mais en restant à l'état liquide.
- \_ **Le resurchauffeur :** est le premier échangeur traversé par les fumées. Il surchauffe la vapeur à ses conditions d'utilisation.
- \_ **Le ballon :** le générateur de vapeur est un ballon de chaudière dans lequel règne un équilibre liquide-vapeur. Il assure un certain relais entre les différents échangeurs et son état (pression, température, niveau...) est étroitement surveillé, car il est le garant du bon fonctionnement de la chaudière de récupération. L'eau froide est envoyée, en permanence, de la bache alimentaire dans l'échangeur économiseur. Ainsi réchauffée, elle passe dans le ballon puis dans l'évaporateur. Au sein du ballon, la phase liquide est séparée de la phase vapeur. La vapeur produite est envoyée dans le surchauffeur.

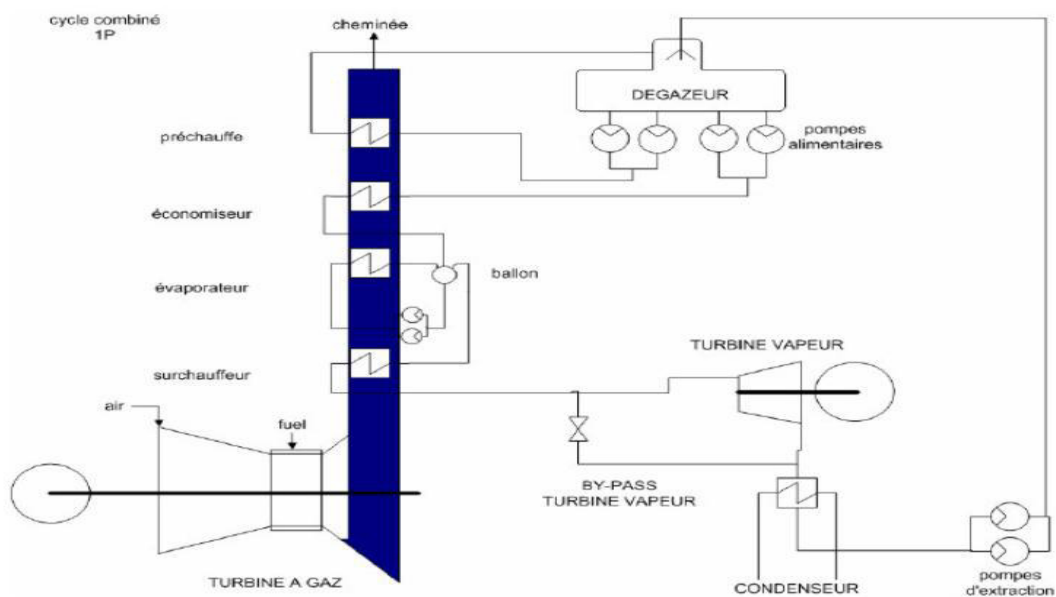


Figure II.21: Chaudière à un niveau de pression (1P).

**b) Chaudière à deux niveaux de pression (2P) :**

Des améliorations de rendement sont possibles en adoptant un cycle eau-vapeur à deux niveaux de pression. Les deux niveaux de pression étant en fait la juxtaposition de deux séries d'échangeurs.

Un niveau de pression HP récupère la chaleur à haute température alors qu'un niveau BP récupère la chaleur à basse température. Comparée au niveau simple pression, la température des fumées à la cheminée diminue.

Deux types d'arrangement existant sur le marché :

- Arrangement en cascade ou série.
- Arrangement en parallèle.

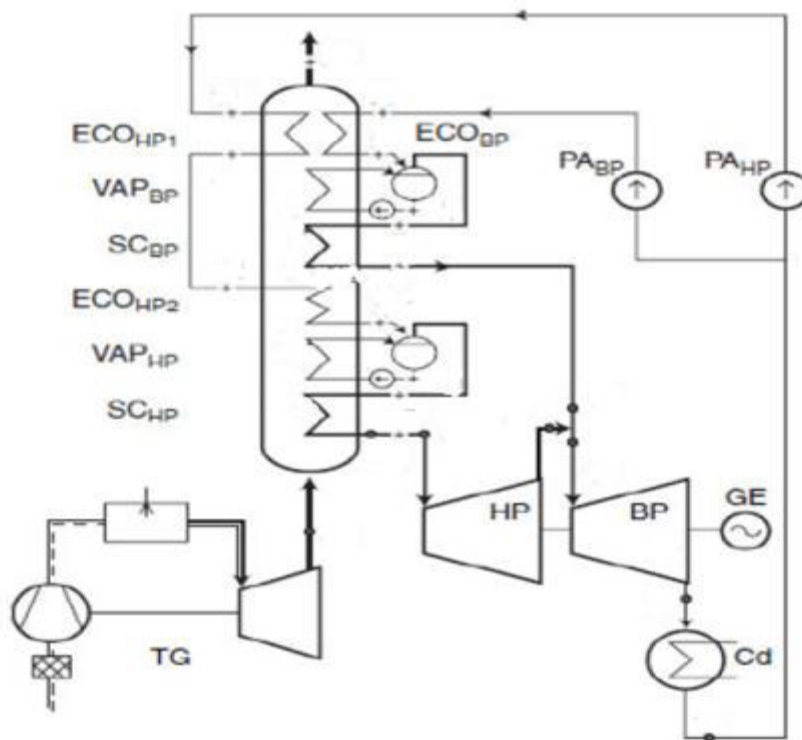


Figure II.22 : Chaudière à deux niveaux de pression (2P).

**c) Chaudière à trois niveaux de pression (3P) :**

Cette chaudière est parmi les meilleures de récupération des gaz d'échappement parce qu'elle se compose de trois nombres de ballon qui sont un ballon basse pression, ballon moyenne pression et ballon haute pression.

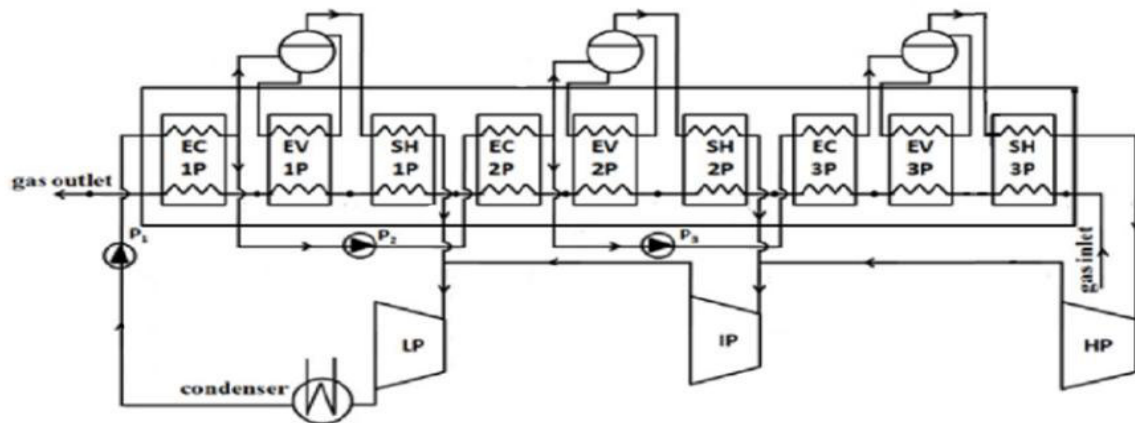


Figure II.23: Chaudière à trois niveaux de pression (3P).

➤ **Selon la disposition des échangeurs :**

- \_ Horizontal.
- \_ Vertical.

➤ **Selon la resurchauffe :**

- \_ **Avec resurchauffe :** c'est un cycle dans lequel on récupère une partie de la vapeur du corps haute pression de la turbine à vapeur, pour la surchauffer à nouveau dans la chaudière afin de la renvoyer une seconde fois dans la turbine.
- \_ **Sans resurchauffe :** les désurchauffeurs sont placés entre deux surchauffeurs, elle consiste de vaporiser de l'eau froide dans la vapeur afin d'abaisser sa température, sans modifier sa pression. Cette opération sert à limiter la température de la vapeur qui part dans la turbine. nécessaire sera importante. Il y a donc un optimum économique à trouvé.

### II.3.10. Diagramme entropique d'un cycle combiné :

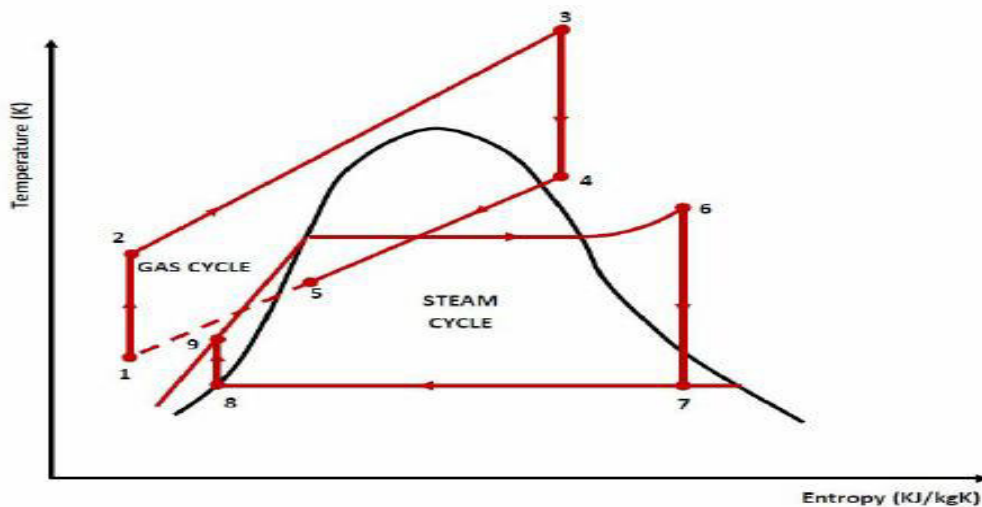


Figure II.24: Diagramme (T-S) d'un cycle combiné

### II.3.11. Caractéristique d'un cycle combiné :

Les systèmes à cycle combiné qui utilisent la vapeur et le gaz ont réalisé un succès commerciale à très grande échelle en raison de :

- ❖ Rendement thermique élevé grâce à la combinaison des deux cycles thermodynamique.
- ❖ Dissipation de la chaleur des fumées de la turbine à gaz, qui a été avantageusement utilisée en tant que source d'énergie pour produire de la vapeur.
- ❖ Les fluides de travail qui sont facilement disponibles, peu coûteux et non toxique.

### II.3.12. Les avantages et les inconvénients :

|  | Avantages                                                                                             | Inconvénients                                                                                             |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | - Les turbines à gaz sont capables d'atteindre le fonctionnement à pleine charge en quelques minutes. | - L'un des inconvénients des turbines à gaz est leur capacité limitée à utiliser différents combustibles. |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b><i>Turbine à gaz</i></b></p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>-En outre, leur coût initial est très intéressant par rapport aux turbines à vapeur.</li> <li>-Rapport poids / puissance élevé.</li> <li>-Nécessite beaucoup moins d'eau que les centrales à turbines à vapeur.</li> <li>-Dimensions et poids réduits par rapport aux turbines à vapeur.</li> <li>-Moins d'espace est nécessaire pour l'installation.</li> <li>-Très faibles émissions toxiques de CO et de HC dues à un excès d'air, à une combustion complète et à l'absence d'étouffement de la flamme sur des surfaces froides.[24]</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-en comparaison avec les turbines à vapeur. En fait, juste un peu de variation dans les spécifications de carburant utilisé dans une turbine à gaz peut conduire à une baisse d'efficacité, augmenter le facteur de maintenance, inspection etc.</li> <li>-Efficacité faible à charge partielle.</li> <li>-En raison des températures de fonctionnement élevées, des matériaux spéciaux et coûteux sont nécessaires.</li> <li>-Une source d'alimentation externe est nécessaire pour démarrer une opération autonome.</li> </ul> |
| <p><b><i>Turbine à vapeur</i></b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-L'un des principaux avantages des turbines à vapeur est la capacité de la chaudière à brûler plusieurs types de combustibles. Par exemple, il peut utiliser le GPL pour l'allumage, le mazout léger pour le démarrage, puis le mazout lourd pour un fonctionnement continu.</li> <li>-La production d'électricité n'est pas affectée par les</li> </ul>                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Long temps de démarrage. Le démarrage d'une turbine à vapeur prend un temps considérable, en particulier lors de démarrages à froid, et nécessite une longue liste d'étapes avant de pouvoir fonctionner à la charge de base.</li> <li>-Par conséquent, les turbines à vapeur ne peuvent pas être utilisées comme centrales de pointe.</li> </ul>                                                                                                                                                                               |

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      | <p>conditions atmosphériques, car elle fonctionne selon un cycle fermé.</p> <p>-Un autre avantage des centrales à turbine à vapeur par rapport aux turbines à gaz est leur efficacité opérationnelle élevée, leur fiabilité accrue.[25]</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <p>-Le fonctionnement d'une centrale à turbine à vapeur nécessite plus de composants que celui d'une turbine à gaz à cycle simple.</p> <p>-Nécessite d'être installé près de grands réservoirs d'eau.</p> <p><b>[25]</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <i>Cycle combiné</i> | <p>-Les Cycles combinés gaz (CCG) ont tout d'abord l'avantage d'obtenir des rendements bien supérieurs à une centrale thermique classique. à quantité de combustible équivalente.</p> <p>-Ces CCG, qui peuvent être démarrés ou éteints en quelques dizaines de minutes, ont également l'avantage de procurer une production très flexible.</p> <p>-la consommation d'énergie primaire est limitée.</p> <p>-La consommation en eau est très réduite grâce la technologie de refroidissement innovante.</p> <p>-Enfin, les CCG permettent de réduire de 50 % les</p> | <p>-les centrales à cycle combiné gaz turbine présente l'inconvénient majeur de voir leurs couts d'exploitation dépendre très fortement de prix du gaz , indexés sue les cours du pétrole.</p> <p>-les exploitants des centrales électriques au gaz n'on ainsi pas de visibilité sur leurs couts d'exploitation, à moins qu'ils n'aient signé un contrat d'approvisionnement de long terme.</p> <p>-beaucoup de bruit.</p> <p>-longue durée de démarrage de l'installation.</p> |



|  |                                                                                                                                                                       |  |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  | émissions de CO <sub>2</sub> , et NO <sub>x</sub> ,<br>et même de supprimer les<br>rejets d'oxyde de soufre<br>(SO <sub>2</sub> ), de poussières, et<br>d'odeurs.[26] |  |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

**Tableau II.2 : les avantages et les inconvénients des trois cycles (à gaz, à vapeur, combiné)**

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné une description détaillée sur les turbines à vapeur et les turbines à gaz ainsi que la chaudière de récupération HRSG d'un cycle combiné. La demande de centrales à cycle combiné a considérablement augmenté durant la dernière décennie. La raison principale de cet intérêt croissant est liée probablement au fait que leur technologie de production de vapeur et/ou d'électricité est la plus efficace sur le marché actuellement et a fait ces preuves. Il existe cependant, d'autres raisons pour s'expliquer ce succès : la disponibilité du gaz et du mazout, la dépense modère d'investissement et un délai court de construction par rapport aux centrales à cycle Rankine.

# Chapitre III

**Etude énergétique de l'installation  
actuelle et la nouvelle installation**

**Introduction :**

Vu l'intitulé de notre Projet, nous avons jugé utile de présenter dans ce chapitre la description de la nouvelle installation.

Aussi, nous traiterons brièvement du principe de la transformation choisie, de la définition des principaux éléments, du choix de la turbine à gaz et la chaudière de récupération (GVR). Et enfin, nous allons procéder à l'étude énergétique de l'installation actuelle et à celle de la nouvelle installation.

L'étude énergétique consiste en finalité à calculer le rendement des deux installations.

Nous utiliserons pour cela la méthode classique et le logiciel matlab faisant intervenir les équations (thermodynamique) des bilans mis en jeu.

**III.1.Le but de la transformation choisie :**

L'objectif se base sur l'amélioration du rendement de l'installation de Ras-Djinet, cette solution consiste à récupérer l'énergie des gaz d'échappement de la turbine à gaz à l'aide d'une chaudière de récupération pour alimenter un cycle à vapeur

**III.2.Choix de la turbine à gaz :**

La turbine à gaz choisi doit garder les mêmes caractéristiques de l'écoulement des fumées dans la chaudière existante à savoir le débit des gaz d'échappement, la température de la sortie de la turbine et la composition chimique du combustible.

La chaudière classique et le GVR vont donc recevoir un pourcentage de débit d'eau de 145.34kg/s.

La turbine à gaz doit avoir un débit d'échappement capable de maintenir une vapeur surchauffée qui correspond au pourcentage voulu afin d'atteindre les mêmes conditions qu'à la vapeur produite par la chaudière classique.

Donc la température des gaz d'échappement de la TAG choisi doivent dépasser les 540 C<sup>0</sup>.

Dans cette étude il est fait référence à la turbine Siemens SGT5-4000F

**III.3.Description de la Turbine à gaz SGT5-4000F :**

La SGT5-4000F est une turbine à gaz du type Heavy-duty d'une puissance nette de 292 MW caractérisée par un design robuste, des performances élevées, une grande fiabilité, un fonctionnement économique et une capacité à démarrer rapidement à froid.

C'est une turbine à un seul corps et un seul arbre. Ce qui signifie que le compresseur et la turbine ont un arbre commun. Celui-ci est supporté par deux paliers logés en dehors de la zone haute pression. Cette configuration garantit un meilleur alignement et une bonne stabilité de marche. L'enveloppe externe, qui absorbe les efforts dus à la pression, est également commune au compresseur et à la turbine.

La fiche technique de la SGT5-4000F est donnée dans le tableau

III.1 et ses performances dans le tableau III. La figure III.1 présente une vue en coupe de la turbine SGT5-4000F et la figure III.2 la montre assemblée [24].

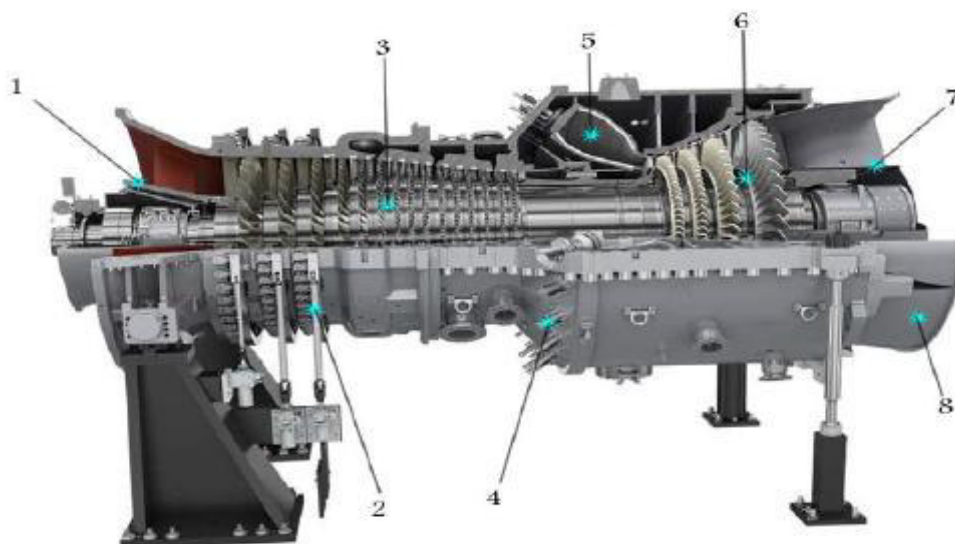
|                                              |                                |
|----------------------------------------------|--------------------------------|
| TURBINE A GAZ SGT5-4000F                     | DONNEES TECHNIQUES             |
| Fréquence                                    | 50 Hz                          |
| COMPRESSEUR                                  |                                |
| Nombre des étages                            | 15                             |
| Nombre des rangées des ailettes variables    | 01                             |
| Orifices de soutirage                        | 03 : 5eme, 9eme et 13eme étage |
| Taux de compression                          | environ 17                     |
| TURBINE                                      |                                |
| Nombre d'étage                               | 04                             |
| CHAMBRE DE COMBUSTION                        |                                |
| Type                                         | Annulaire                      |
| Nombre de bruleurs                           | 24                             |
| Nombre de dispositifs d'allumage par bruleur | 01                             |
| SYSTEME DE VIRAGE                            |                                |
| Type                                         | Moteur hydraulique             |
| Nombre                                       | 01                             |
| Vitesse                                      | 3000 tr/min                    |

**Tableau III.1 : Fiche technique de la SGT5-4000F [25]**

| TURBINE A GAZ SGT5-4000F                       | CHARGE DE BASE |            |
|------------------------------------------------|----------------|------------|
| Combustible                                    | gaz            | Fuel       |
| Puissance nominale aux bornes de l'alternateur | 249.2 MW       | 210.5 MW   |
| Rendement aux bornes de l'alternateur          | 38.4 %         | 36.9 %     |
| Débit des gaz d'échappement                    | 616.2 Kg/S     | 610.9 Kg/S |
| Température des gaz d'échappement              | 589.1 °C       | 557.4 °C   |
| Débit de combustible                           | 14.3 Kg/S      | 13.2 Kg/S  |

**Tableau III.2 : les performances de la SGT5-4000F [25]**

Ces performances données à une température de 15 °C, une pression de 1 atm et une humidité de 60%



**Figure III.1 : Vue en coupe de la SGT5-4000F [25]**

- 1- Corps de palier du compresseur
- 2- Leviers de commandes des aubes directrices
- 3- Compresseur
- 4- Bruleurs
- 5- Chambre de combustion annulaire
- 6- Turbine
- 7- Corps de palier de la turbine
- 8- Enveloppe extérieure (casing)

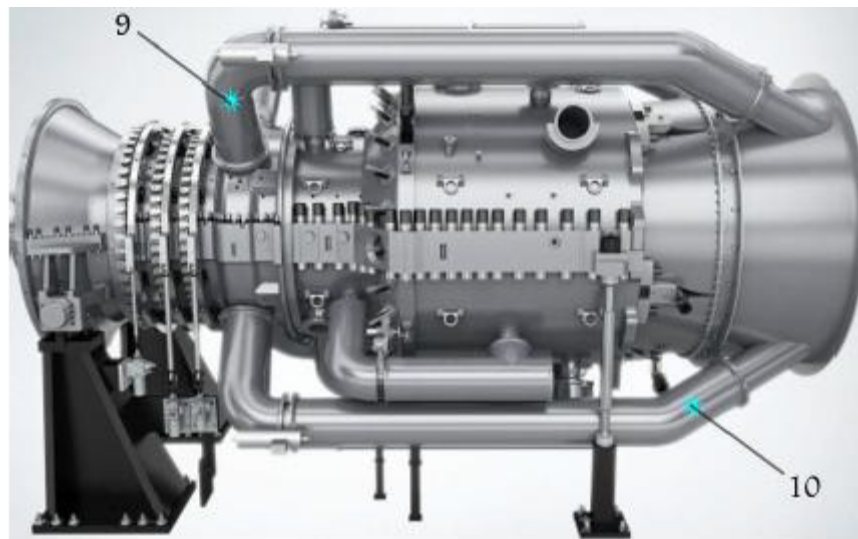


Figure III.2 : La SGT5-4000F assemblée [25]

- 9- Extraction d'air du compresseur      10- Injection d'air frais à la sortie

#### **III.4.La chaudière de récupération : [26]**

La chaudière de récupération, appelée aussi générateur de vapeur à récupération (GVR) est un échangeur de chaleur à contre courant, elle représente l'interface entre la turbine à gaz et le cycle eau/vapeur.

Le GVR qui sera installé en aval de la TG est de design horizontal, sans postcombustion à trois niveaux de pression, elle fonctionne en mode de circulation naturelle pour les trois niveaux de pression BP, MP et HP.

La chaleur contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz, sert de source de chaleur pour produire la vapeur (vapeur surchauffée HP, MP, et BP), le condensat est fourni à l'économiseur à Basse Pression (BP) par les pompes d'extraction.



Figure III.3 : Chaudière de récupération

### III.5. Calcul de débit d'eau pénétrant la chaudière de récupération :

- Une programmation sur matlab va nous permettre d'avoir les températures à chaque niveau de pression dans le GVR et le calcul du débit d'eau venant du condenseur.
- Un bilan thermique sur l'ensemble des échangeurs :

$Q_{\text{gaz chauds}}$  et la température en sortie de la turbine à gaz sont connus.

La pression maximale, moyenne et minimale du cycle vapeur étant fixée, la température maximale et minimale, ainsi que les pertes de pression et de température.

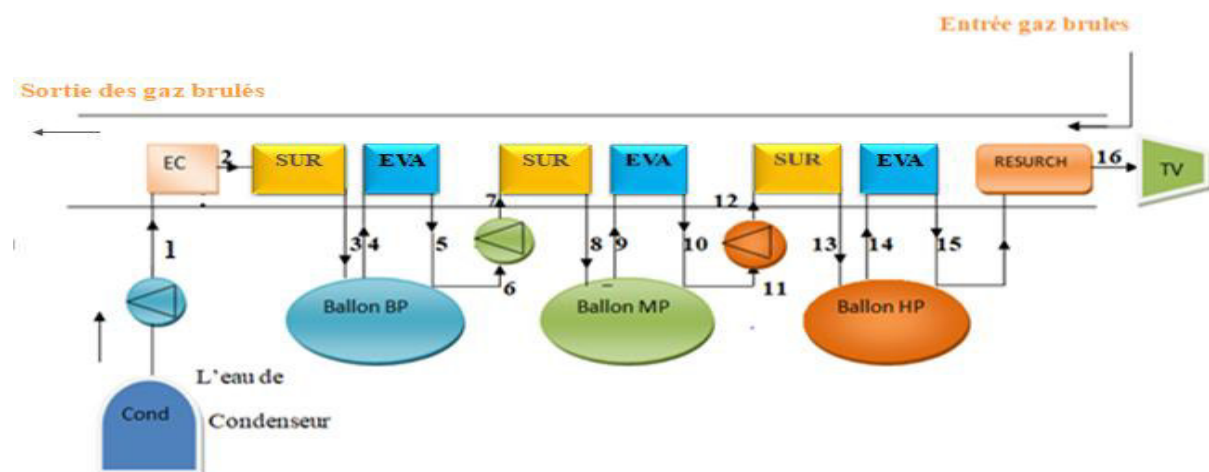


Figure III.4: schéma simplifié d'une chaudière de récupération

On déduit :  $T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}$  (voir annex1)

Basse pression :

$$T_2 = T_1 + dTB.$$

$$T_3 = (T_2 + T_B)/2, T_4 = T_5 = T_6 = T_B, \text{ et } T_7 = T_6 + dTB$$

$$BP : me.Ce.(T_3 - T_2)$$

Moyenne pression :

$$T_8 = (T_7 + T_M)/2, T_9 = T_{10} = T_{11} = T_M \text{ et } T_{12} = T_M + dTM$$

$$MP : me.Ce.(T_8 - T_7)$$

Haut Pression :

$$T_{13} = T_{14} = T_H \text{ et } T_{16} = T_{15} + dTH$$

Ce tableau présente les résultats obtenus :

| Point | Pression<br>(bar) | Température<br>(°C) | Point | Pression<br>(bar) | Température<br>(°C) |
|-------|-------------------|---------------------|-------|-------------------|---------------------|
| 1     | 16.8              | 33                  | 9     | 55                | 269,967007          |
| 2     | 17.3              | 31.1                | 10    | 55                | 269,967007          |
| 3     | 15.8              | 128,52824           | 11    | 55                | 269,967007          |
| 4     | 25                | 223,95648           | 12    | 55.5              | 271,067007          |
| 5     | 25                | 223,956487          | 13    | 55.5              | 354,671156          |
| 6     | 25                | 223,956487          | 14    | 175               | 354,671156          |
| 7     | 25.5              | 224,056487          | 15    | 175               | 537,9               |
| 8     | 55                | 247,011747          | 16    | 138.20            | 535                 |

**Tableau III.3 : températures et pressions dans chaque niveau de pression**

D'après le principe de conservation d'énergie on a:

$$m_{\text{froid}} \cdot C_{\text{froid}} \cdot \Delta T_{\text{froid}} = m_{\text{chaud}} \cdot C_{\text{chaud}} \cdot \Delta T_{\text{chaud}}$$

$$me[C_{\text{eau}}[(T_3 - T_2) + (T_B - T_3) + (T_8 - T_7) + (T_M - T_8) + (T_{13} - T_{12}) + (T_{16} - T_{15})] + L_v] = Q_{\text{gaz chaud}} \cdot C_{\text{chaud}} \cdot (T_e - T_s)$$



donc :  $m_e = Q_{\text{gaz chaud}} \cdot C_{\text{chaud}} \cdot (T_e - T_s) / [C_{\text{eau}}[(T_3 - T_2) + (T_B - T_3) + (T_8 - T_7) + (T_M - T_8) + (T_{13} - T_{12}) + (T_{16} - T_{15})] + L_v]$ .

$$\mathbf{A.N : } m_e = (678,9 \cdot 1400 \cdot (589,1 - 90)) / (((128,528244 - 33,1) + (223,956487 - 128,528244) + (247,011747 - 224,056487) + (269,967007 - 247,011747) + (354,671156 - 271,067007) + (537,9 - 354,671156)) \cdot 4180 + 2257000) = \mathbf{108,750428 \text{ Kg/s}}$$

Alors ce débit sera utilisé dans le GVR (108,75Kg/s) et le reste (36.59Kg/s) va être transmis directement à l'ancienne chaudière, c'est-à-dire l'installation actuel fonctionne à 25% charge pour un seul groupe.

### III.6. Étude énergétique de la centrale de Ras-Djinet :

#### III.6.1. Le rendement de cycle :

Le rendement de cycle est le rapport de l'énergie mécanique utile pour entraîner l'alternateur sur l'énergie calorifique produite dans la chaudière qui reçue par le fluide, qui montré l'efficacité de l'installation. Il définie par :

$$\eta_{\text{Cycle}} = W_{\text{utile}} / Q_{\text{ch}} \quad (3-1)$$

Tel que:

$$W_{\text{utile}} = W_t - W_p \quad (3-2)$$

$W_t$  : le travail de la turbine.

$W_p$  : le travail des pompes.

$$W_p = W_{\text{pex}} + W_{\text{pa}} \quad (3-3)$$

$W_{\text{pex}}$  : le travail de pompes d'extraction.

$W_{\text{pa}}$  : le travail de la pompe alimentaire.

$Q_{\text{ch}}$  : La quantité de chaleur fournie par la chaudière

A partir de l'équation (1) et (2) dans (3) on obtient :

$$\eta_{\text{Cycle}} = [W_t - (W_{\text{pex}} + W_{\text{pa}})] / Q_{\text{ch}} \quad (3-4)$$

On introduisant les rendements mécaniques dans l'équation (3-4) et on écrit :

$$\eta_{\text{Réal}} = [(W_t \times \eta_{\text{mTv}}) - ((W_{\text{pex}} / \eta_{\text{mpex}}) + (W_{\text{pa}} / \eta_{\text{pa}}))] / (Q_{\text{ch}} / \eta_{\text{ch}})$$

➤ **Les rendements sont des valeurs fixes données par le constructeur :**

- ✓ Rendement mécanique de la turbine à vapeur:  $\eta_{mTAV} = 0,98$
- ✓ Rendement mécanique de la pompe d'extraction:  $\eta_{Pex} = 0,78$
- ✓ Rendement mécanique de la pompe d'alimentation:  $\eta_{Pa} = 0,775$
- ✓ Rendement de la chaudière:  $\eta_{Ch} = 0,86$

### III.6.2. Le premier principe de la thermodynamique :

Dans cette étude les calculs sont faits pour 1 Kg de fluide sortante de la chaudière.

$Q_m \longrightarrow 1 \text{ Kg}$

$Q_m$  : débit massique [kg/s]

On applique l'équation de premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert :

**L'équation de 1<sup>er</sup> principe :  $Q + W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$  (3-5)**

**Avec :**

- **W** : Le travail fournit ou absorbé par l'organe.
- **Q** : la quantité de chaleur absorbé ou fournit par l'organe.
- **$\Delta E_c$**  : variation de l'énergie cinétique.
- **$\Delta H$**  : Enthalpie totale.
- **$\Delta E_p$**  : variation de l'énergie potentielle.

La variation de l'énergie cinétique est négligeable devant la variation d'enthalpie  $\Delta E_c$

$\ll \Delta H$

La variation de l'énergie potentielle égale à 0 vu que l'entrée et la sortie de la vapeur sont sur le même niveau  $\Delta E_p = 0$

L'équation (3-5) du 1<sup>er</sup> principe devient :

$$Q + W = \Delta H$$

$$W + Q = m_s h_s - m_e h_e$$

Avec:

- $m_s, m_e$  : Les fractions du débit à l'entrée et à la sortie de l'organe.
- $h_s, h_e$  : L'enthalpie massique du fluide à l'entrée et à la sortie de l'organe.

D'après l'équation de conservation de la masse on a :  $m_s = m_e = m$

Comme le débit massique entrant diffère au débit massique sortant à cause des fuites et des soutirages donc on peut écrire :

$$1 \text{ kg} \longrightarrow Q_{m \text{ TOTALE}} \text{ [kg/s]}$$

$$m \text{ (kg)} \longrightarrow Q_{m \text{ TOTALE}} - \sum fuites \text{ [kg/s]}$$

$Q_{m \text{ TOTALE}}$  : débit massique totale [kg/s]

Donc:  $m = (Q_{m \text{ TOTALE}} - \sum fuites) / Q_{m \text{ TOTALE}}$

$$m = 1 - (\sum fuites / Q_{m \text{ TOTALE}})$$

On obtient:  $W + Q = m (h_e - h_s)$

$$W + Q = (h_e - h_s) (1 - (\sum fuites / Q_{m \text{ TOTALE}}))$$

Tel que:

- Les transformations sont adiabatiques dans la turbine et les pompes  $Q = 0$
- Production de travail dans la chaudière :  $W = 0$
- Les soutirages sont considérés comme fuites.

### III.6.3. Les différentes stations du circuit thermique :

| La transformation      | Le Comportement du fluide                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------|
| $1' \longrightarrow 1$ | La vapeur subit des pertes de charges dans les conduites.  |
| $1 \longrightarrow 2$  | La vapeur se détend dans la turbine corps haut pression HP |
| $2 \longrightarrow 3$  | Resurchauffe de la vapeur sortante de corps HP             |

|         |                                                                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 → 5   | La vapeur se détend dans le corps MP avec deux soutirages S5 et S4                                            |
| 5 → 9   | La vapeur rentre dans le corps BP avec trois soutirages                                                       |
| 9 → 10  | La vapeur est condensée dans le condenseur                                                                    |
| 10 → 11 | L'eau est pompée par une pompe d'extraction                                                                   |
| 11 → 12 | L'eau d'extraction passe par le réfrigérant d'alternateur pour refroidir H2                                   |
| 12 → 14 | L'eau d'extraction refroidis les buées de vapeur et la vapeur des éjecteurs                                   |
| 14 → 15 | Refroidissement du condensat auxiliaire du corps BP ressemblés dans refroidisseur.                            |
| 15 → 18 | Refroidissement de l'eau d'extraction dans les réchauffeurs BP1, BP2, BP3.                                    |
| 18 → 19 | La bache alimentaire reçoit de l'eau d'extraction traverse certain réchauffeur et de la vapeur soutirée de S4 |
| 19 → 20 | Alimentation de la chaudière par les pompes alimentaires                                                      |
| 20 → 22 | Réchauffement de l'eau d'alimentation dans les réchauffeurs HP5 et HP6.                                       |
| 22 → 1' | Passage de l'eau de l'état liquide a l'état vapeur dans la chaudière                                          |

#### III.6.4. Soutirages :

- **Soutirages S6 et S5** : en traversant les réchauffeurs HP6 et HP5 respectivement subit trois transformations (désurchauffe, condensation, refroidissement).
- **Soutirage S4 et S3** : la vapeur soutirée en traversant la bache alimentaire et le réchauffeur BP3 respectivement elle sera désurchauffée et condensée.

- **Soutirage S2 et S1** : la vapeur soutirée en traversant les réchauffeurs BP2 et BP1 elle sera désurchauffée et condensée.

Ce précédé permet de :

- ❖ réaliser des économies importantes de combustible, qui sont encore accrues de l'influence favorable qu'il exerce sur le rendement du cycle.
- ❖ De diminuer la masse de vapeur au condenseur. Il en résulte une diminution de la perte au condenseur.
- ❖ La chaudière doit fournir plus de vapeur mais elle reçoit de l'eau réchauffée, le débit de vapeur soutirée est égal à 30% du débit vapeur totale.
- ❖ De diminuer la dimension de la turbine.

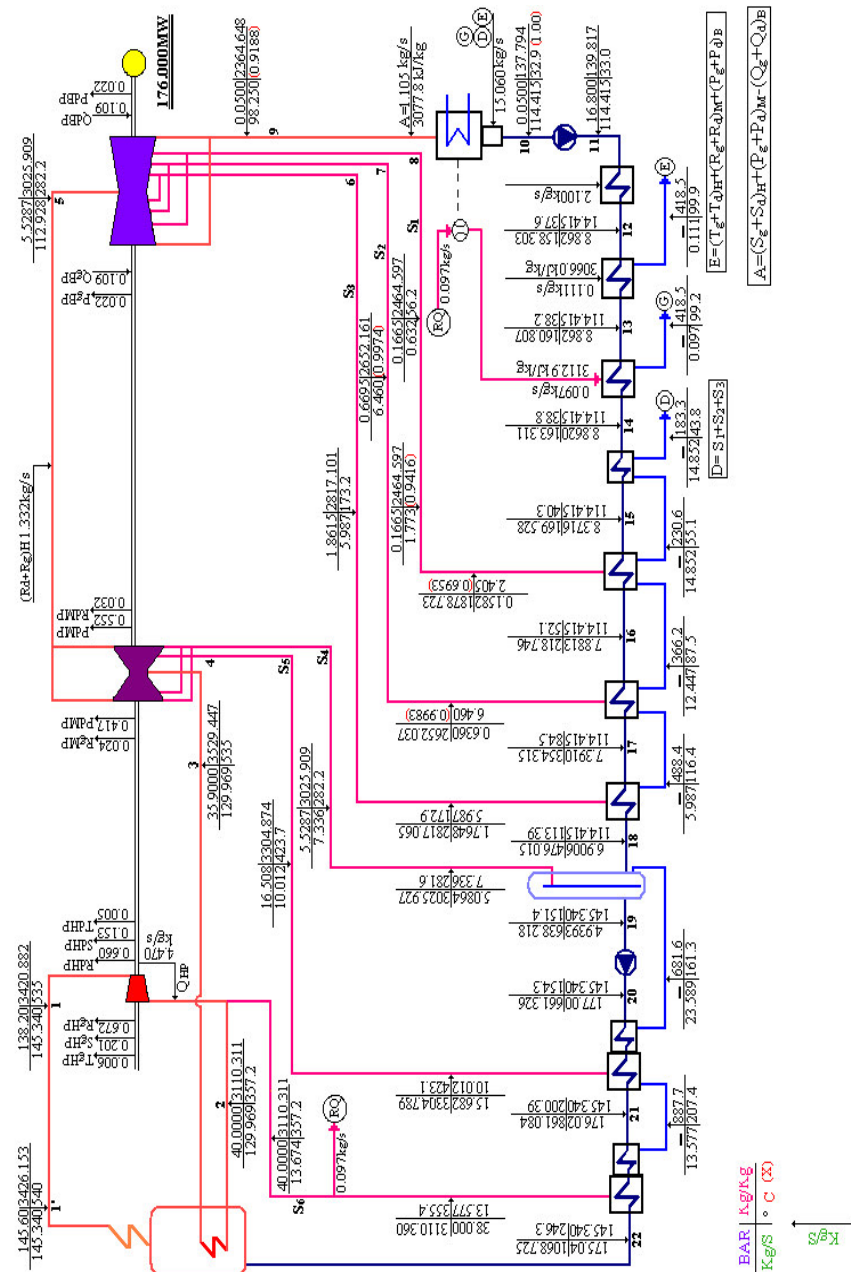


Figure III.5: Les paramètres du circuit eau-vapeur en fonctionnement normal (100% de charge et six soutirages)

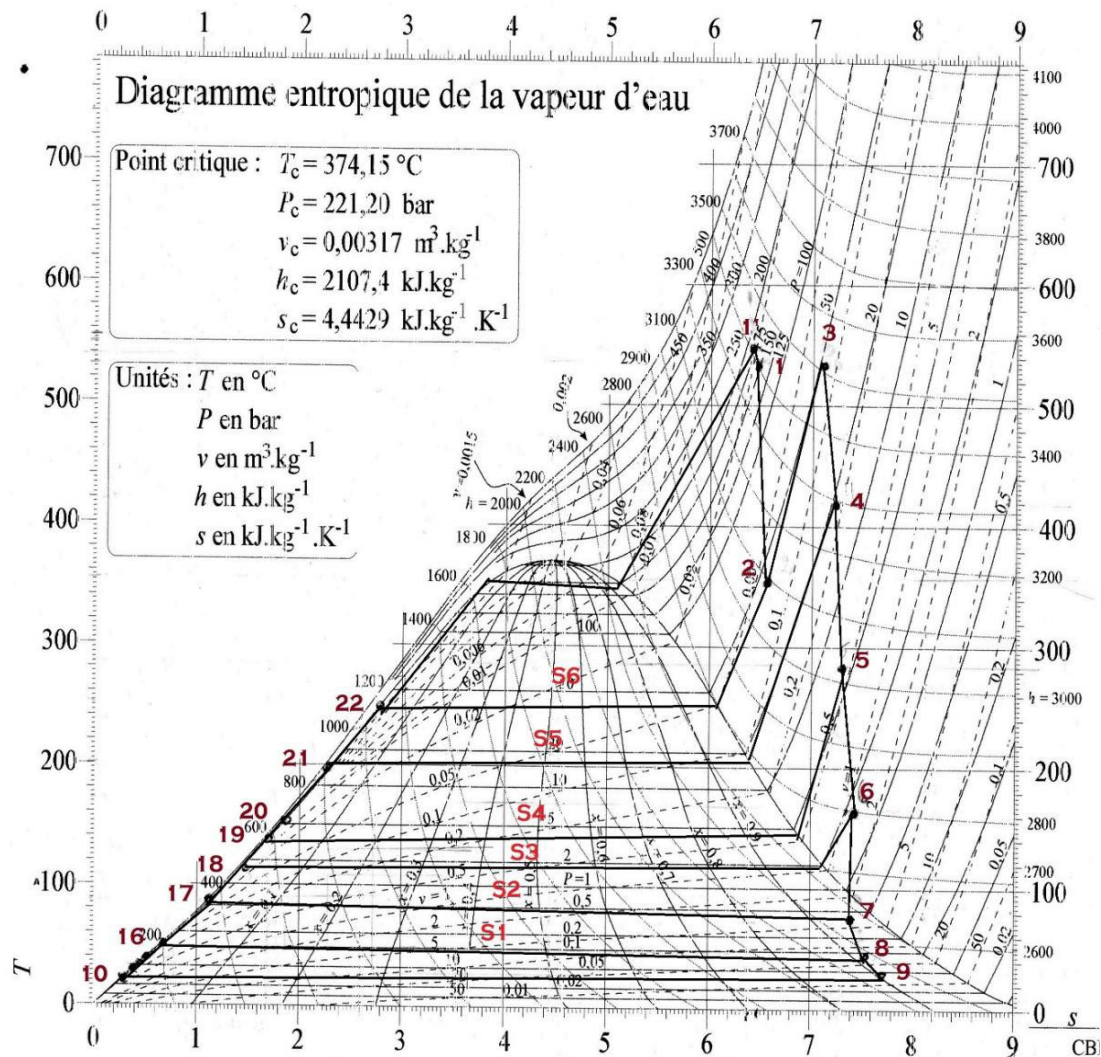


Figure III.6: Diagramme (T, S) à six soutirages de centrale Ras-Djinet

### III.6.5. Les données de L'installation :

#### ➤ Les Paramètres thermodynamiques du circuit eau-vapeur :

Les températures, les pressions et les débits sont relevées à partir de la salle de commande à l'aide des capteurs se trouvant aux différents points de la station.

#### ➤ Calcul des enthalpies et des entropies aux différents points de cycle :

A la sortie de la chaudière le point 1' a pour paramètres :

$P = 145.6\text{ bar}$   $t = 540\text{ °C}$  d'après la programmation sur matlab on a trouvé les valeurs exacts d'enthalpie et d'entropie  $h_{1'} = 3428.1\text{ KJ/Kg}$

Toutes les valeurs d'enthalpie et d'entropie qui vont suivre seront calculées de la même manière que ci-dessous (voir annexe 2).

Présentation de différents paramètres du cycle vapeur actuel sur le tableau suivant :

| Point | T (°C) | P (bar) | h (KJ/Kg) | X (%)  | S (KJ/Kg.C) | Q (Kg/s) |
|-------|--------|---------|-----------|--------|-------------|----------|
| 1'    | 540    | 145,6   | 3428,1    | -      | 6,508       | 145,340  |
| 1     | 535    | 138,2   | 3422,7    | -      | 6,523       | 145,340  |
| 2     | 357,2  | 40      | 3111,2    | -      | 6,612       | 129,969  |
| 3     | 535    | 35,9    | 3530      | -      | 7,246       | 129,969  |
| 4     | 423,7  | 16,508  | 3305,5    | -      | 7,299       | 10,012   |
| 5     | 282,2  | 5,520   | 3026,400  | -      | 7,348       | 7,336    |
| 6     | 173,2  | 1,861   | 2817,40   | -      | 7,425       | 5,987    |
| 7     | 88,78  | 0,669   | 2657,6    | 0,9974 | 7,494       | 6,460    |
| 8     | 56,150 | 0,166   | 2602,1    | 0,9416 | 7,972       | 2,405    |
| 9     | 32,88  | 0,05    | 2364,800  | 0,9188 | 7,752       | 98,250   |
| 10    | 32,90  | 0,05    | 137,830   | 1      | 0,476       | 114,415  |
| 11    | 33     | 16,8    | 139,790   | -      | 0,477       | 114,415  |
| 12    | 37,60  | 8,862   | 158,29    | -      | 0,540       | 114,415  |
| 13    | 38,20  | 8,862   | 160,80    | -      | 0,548       | 114,415  |
| 14    | 38,80  | 8,862   | 163,307   | -      | 0,556       | 114,415  |
| 15    | 40,30  | 8,371   | 169,539   | -      | 0,576       | 114,415  |
| 16    | 52,10  | 7,881   | 218,789   | -      | 0,730       | 114,415  |
| 17    | 84,50  | 7,391   | 354,380   | -      | 1,128       | 114,415  |
| 18    | 113,39 | 6,9     | 476,11    | -      | 1,455       | 114,415  |
| 19    | 151,40 | 4,939   | 638,240   | -      | 1,855       | 145,340  |
| 20    | 154,30 | 177     | 661,39    | -      | 1,866       | 145,340  |
| 21    | 200,39 | 176,02  | 861,012   | -      | 2,31        | 145,340  |



|    |       |        |        |   |       |          |
|----|-------|--------|--------|---|-------|----------|
| 22 | 246,3 | 175,04 | 1068,9 | - | 2,729 | 145 ,340 |
|----|-------|--------|--------|---|-------|----------|

**Tableau III.4: Paramètres des différents points de cycle.**➤ **Les débits des soutirages :**

| S1 [Kg/s] | S2 [Kg/s] | S3 [Kg/s] | S4 [Kg/s] | S5 [Kg/s] | S6 [Kg/s] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2,405     | 6,460     | 5,987     | 7,336     | 10,012    | 13,674    |

**Tableau III.5 : Les débits des soutirages.**• **Les débits des fuites et des fuites Récupérées:**

Malgré que toutes les étanchéités des corps de la turbine interdisent les fuites de vapeur motrice dans l'atmosphère, la construction des corps contient des emplacements d'évacuation de la vapeur, pour un usage spécifique.

| Côté droit de corps HP (Kg/s) | Côté gauche de corps HP (Kg/s) | Côté droit de corps MP (Kg/s) | Côté gauche de corps MP (Kg/s) | Côté droit de corps BP (Kg/s) | Côté gauche de corps BP (Kg/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| A <sub>dHP</sub> =0,660       | A <sub>gHP</sub> =0,672        | B <sub>dMP</sub> =0,552       | B <sub>gMP</sub> =0,417        | C <sub>dBP</sub> =0,022       | C <sub>gBP</sub> =0,022        |
| B <sub>dHP</sub> =0,153       | B <sub>gHP</sub> =0,201        | C <sub>dMP</sub> =0,032       | C <sub>gMP</sub> =0,024        | B <sub>dBPR</sub> = 0,109     | B <sub>gBPR</sub> =0 ,109      |
| C <sub>dHP</sub> =0,005       | C <sub>gHP</sub> =0,006        | A <sub>dMPR</sub> =1 ,392     | --                             | --                            | --                             |
| D <sub>dHP</sub> = 4,47       | --                             | --                            | --                             | --                            | --                             |

**Tableau III.6: les débits des fuites**

A, B, C, D : des fuites

d:droite      g : gauche      A<sub>dMPR</sub>, B<sub>dBPR</sub>, B<sub>gBPR</sub> : des fuites Récupérées.

**III.6.6.Calcul des travaux : (voir annex3) :**

Tel que :

- ✓ Q<sub>m</sub> : débit de la vapeur sortante de la chaudière.
- ✓ Q<sub>r</sub> : débit des fuites récupérées.
- ✓ Q<sub>f</sub> : débit des fuites.
- ✓ S : débit des soutirages.

### ➤ travail de la turbine

Le travail total de la turbine est :  $W_{T,TAV} = W_{HP} + W_{MP} + W_{BP}$

#### ❖ Le travail de corps HP $W_{HP}$ :

**REMARQUE : La vapeur soutirée de corps HP n'est pas considérée comme une fuite (dans le travail de corps HP) car elle est prise à la sortie de corps.**

Dans le corps HP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP}$ ,  $S=0$ ,  $Q_m=145.340 \text{ kg/s}$

$$W_{HP} = (h_1 - h_2) (1 - (A+B+C+D)_{dHP} / Q_m)$$

$$W_{HP} = (3422, 7 - 3111, 2) (1 - (4,470 + 0,660 + 0,153 + 0,005) / 145,340)$$

$$W_{HP} = 300.16 \text{ KJ/Kg}$$

#### ❖ Le travail de corps MP $W_{MP}$ :

Dans le corps MP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP}$ ,

$$Q_m = 145,340 \text{ kg/s}$$

$$W_{MP} = (h_3 - h_4) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6) / Q_m) + (h_4 - h_5) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5) / Q_m).$$

$$W_{MP} = (3530, -3305, 5) [1 - ((0, 66 + 0,153 + 0,005) + (0,672 + 0,201 + 0,006) + 13,674) / 145,340] + (3304, 18 - 3027, 20) [1 - ((0, 66 + 0,153 + 0,005) + (0,672 + 0,201 + 0,006) + 13,574 + 10,012) / 145,340]$$

$$W_{MP} = 431, 11 \text{ KJ/Kg}$$

#### ❖ Le travail du corps BP $W_{BP}$ :

Dans le corps BP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + (B+C)_{gMP} + (B+C)_{gMP}$

$$W_{BP} = (h_5 - h_6) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_6 - h_7) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_7 - h_8) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + S_2 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_8 - h_9) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + S_2 + S_1 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m).$$

$$\begin{aligned}
W_{BP} = & (3026,4-2817,4) (1- ((0,153+0,005+0,660+4.470) + (0,201+0,006+0,672) + \\
& 13,674+10,012+7,336+ (0,032+0,552) + (0,024 +0,417-1,332))/ 145,340) + (2817,4 - 2657,6) \\
& (1- ((0,153+0,005+0,660+4.470) + (0,201+0,006+0,672) + 13.674+10.012+7.336+5.987+ \\
& (0,032+0,552) + (0,024 +0,417-1,332))/ 145,340) + (2657,6-2602,1) (1- \\
& ((0,153+0,005+0,660+4.470) + (0,201+0,006+0,672) + 13,674+10,012+7,336+5,987+6,460+ \\
& (0,032+0,552) + (0,024 +0,417-1,332))/ 145,340) + (2602,1-2364,8) (1- \\
& ((0,153+0,005+0,660+4.470) + (0,201+0,006+0,672) + \\
& 13,674+10,012+7,336+5,987+6,460+2,405+ (0,032+0,552) + (0,024 +0,417-1,332))/ \\
& 145,340).
\end{aligned}$$

$$W_{BP} = 478,74 \text{ KJ/Kg}$$

❖ **Le travail total de la turbine à vapeur :**

$$W_{T,TAV} = W_{HP} + W_{MP} + W_{BP}$$

$$W_{T,TAV} = 297,1311 + 429,7329 + 481,7136$$

$$W_{T,TAV} = 1210 \text{ KJ/Kg}$$

➤ **Le travail et puissance des pompes :**

❖ **Calcul de travail de la Pompe d'extraction :**

$$Q_r = RQ = 0.097 \text{ kg/s}, Q_f = 0,$$

$$S = S_6 + S_5 + S_4$$

$$S = 13,674 + 10,012 + 7,336$$

$$S = 31.022 \text{ kg/s}$$

$$W_{pex} = (h_{11} - h_{10}) (1 + (RQ - S_6 - S_5 - S_4) / Q_m)$$

$$W_{pex} = (139,92 - 137,83) (1 + (0,097 - (13,674 + 10,012 + 7,336)) / 145,340)$$

$$W_{pex} = 1,65 \text{ KJ/Kg}$$

❖ **Calcul de la puissance de la Pompe d'extraction :**

$$P_{pex} = W_{pex} * Q_m$$

$$P_{pex} = 1.65 * 145.340$$

$$P_{pex} = 238,81 \text{ W}$$

## ❖ Calcul de travail de la Pompe alimentaire:

$$Q_r = 0, Q_f = 0, S = 0,$$

$$W_{pa} = (h_{20} - h_{19})$$

$$W_{pa} = (661,35 - 638,24)$$

$$W_{pa} = 23,29 \text{ KJ/Kg}$$

## ❖ Calcul de la puissance de la Pompe alimentaire :

$$P_{pa} = W_{pa} * Q_m$$

$$P_{pa} = 23,29 * 145,340$$

$$P_{pa} = 3384,9 \text{ W}$$

## III.6.7. Calcul de la quantité de chaleur fournie par la chaudière :

$$Q_{ch} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_2) (1 - ((A+B+C) d_{HP} + (A+B+C) g_{HP} + S_6) / Q_m)$$

$$Q_{ch} = (3428,1 - 1068,6) + (3530,3 - 3111,2) (1 - ((0,66 + 0,153 + 0,005) + (0,627 + 0,201 + 0,006) + 13,674) / 145,340)$$

$$Q_{ch} = 2733,7 \text{ KJ/Kg}$$

## III.6.8. Evaluation du rendement thermique :

$$\eta_{cycle} = \frac{(W_t \eta_{mtv}) - [(W_{pex} / \eta_{pex}) + (W_{pa} / \eta_{pa})]}{Q_{ch} / \eta_{ch}}$$

$$\eta_{cycle} = [(1210 \times 0,98) - ((1,65 / 0,78) + (23,29 / 0,775))] / (2733,7 / 0,86)$$

$$\eta_{\text{réel de cycle}} = 38,19\%$$

### III.6.9. Calcul de travail de la turbine, pompe alimentaire et pompe d'extraction à chaque charge : (voir annexe 4)

Pour 25% de charge :

❖ Le travail de corps MP  $W_{MP}$  :

$$W_{HP25\%} = (h_1 - h_2) (1 - (A+B+C+D)_{dHP}) / Q_m$$

$$W_{HP25\%} = 329.95 \text{ KJ/Kg}$$

❖ Le travail de corps MP  $W_{MP}$  :

Dans le corps MP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP}$ ,

$$Q_m = 145,340 \text{ kg/s}$$

$$W_{MP} = (h_3 - h_4) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6) / Q_m) + (h_4 - h_5) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5) / Q_m).$$

$$W_{MP25\%} = 402.77 \text{ KJ/Kg}$$

❖ Le travail du corps BP  $W_{BP}$  :

Dans le corps BP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + (B+C)_{gMP} + (B+C)_{gMP}$

$$W_{BP25\%} = (h_5 - h_6) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_6 - h_7) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_7 - h_8) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + S_2 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_8 - h_9) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + S_2 + S_1 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m).$$

$$W_{BP25\%} = 449.76 \text{ KJ/Kg}$$

❖ Travail de la pompe alimentaire :

$$W_{pa} = (h_{20} - h_{19}) = 44.3 \text{ KJ/Kg}$$

❖ Travail de la pompe d'extraction

$$W_{pex} = (h_{11} - h_{10}) (1 + (RQ - S_6 - S_5 - S_4) / Q_m) = 4.16 \text{ KJ/Kg}$$

**Pour 50% de charge :**

❖ **Le travail de corps HP  $W_{MP}$  :**

$$W_{HP50\%} = (h_1 - h_2) (1 - (A+B+C+D)_{dHP}) / Q_m$$

$$W_{HP50\%} = 331.94 \text{ KJ/Kg}$$

❖ **Le travail de corps MP  $W_{MP}$  :**

Dans le corps MP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP}$ ,

$$Q_m = 145,340 \text{ kg/s}$$

$$W_{MP50\%} = (h_3 - h_4) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6) / Q_m) + (h_4 - h_5) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5) / Q_m).$$

$$W_{MP50\%} = 437.68 \text{ KJ/Kg}$$

❖ **Le travail du corps BP  $W_{BP}$  :**

Dans le corps BP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + (B+C)_{gMP} + (B+C)_{gMP}$

$$W_{BP50\%} = (h_5 - h_6) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_6 - h_7) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_7 - h_8) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + S_2 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_8 - h_9) (1 - ((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6 + S_5 + S_4 + S_3 + S_2 + S_1 + (B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m).$$

$$W_{BP50\%} = 498.59 \text{ KJ/Kg}$$

❖ **Travail de la pompe alimentaire :**

$$W_{pa} = (h_{20} - h_{19}) = 23.5 \text{ KJ/Kg}$$

❖ **Travail de la pompe d'extraction**

$$W_{pex} = (h_{11} - h_{10}) (1 + (RQ - S_6 - S_5 - S_4) / Q_m) = 2.63 \text{ KJ/Kg}$$

**Pour 75% de charge :**

❖ **Le travail de corps HP  $W_{MP}$  :**

$$W_{HP75\%} = (h_1 - h_2) (1 - (A+B+C+D)_{dHP}) / Q_m$$

$$W_{HP75\%}=328.27\text{KJ/Kg}$$

❖ **Le travail de corps MP  $W_{MP}$  :**

Dans le corps MP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP}$ ,

$$Q_m=145,340 \text{ kg/s}$$

$$W_{MP75\%} = (h_3-h_4) (1-((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6) / Q_m) + (h_4-h_5) (1-((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6+S_5) / Q_m).$$

$$W_{MP75\%} = 437.09\text{KJ/Kg}$$

❖ **Le travail du corps BP  $W_{BP}$  :**

Dans le corps BP on a :  $Q_r = 0$ ,  $Q_f = (A+B+C+D)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + (B+C)_{gMP} + (B+C)_{gMP}$

$$W_{BP75\%} = (h_5-h_6) (1-((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6+S_5+S_4+(B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_6-h_7) (1-((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6+S_5+S_4+S_3+(B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_7-h_8) (1-((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6+S_5+S_4+S_3+S_2+(B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m) + (h_8-h_9) (1-((A+B+C)_{dHP} + (A+B+C)_{gHP} + S_6+S_5+S_4+S_3+S_2+S_1+(B+C)_{dMP} + (B+C)_{gMP} - A_{dMPR}) / Q_m).$$

$$W_{B75\%}=496.35\text{KJ/Kg}$$

❖ **Travail de la pompe alimentaire :**

$$W_{pa}=(h_{20}-h_{19})=27.6\text{KJ/Kg}$$

❖ **Travail de la pompe d'extraction**

$$W_{pex} = (h_{11}-h_{10}) (1 + (RQ-S_6-S_5-S_4) / Q_m) = 2.009\text{KJ/Kg}$$

**Alors le travail de la turbine :**

$$W_{t25\%}=W_{HP}+W_{MP}+W_{BP}=1182.5\text{KJ/Kg}.$$

$$W_{t50\%}=W_{HP}+W_{MP}+W_{BP}=1268.2\text{KJ/Kg}.$$

$$W_{t75\%}=W_{HP}+W_{MP}+W_{BP}=1261.7\text{KJ/Kg}.$$

**III.6.10. Calcul de la quantité de chaleur fournie par la chaudière à chaque charge :**

$$Q_{ch\ 25\%} = (h_{s25} - h_{t25}) + (h_3 - h_2) (1 - ((A+B+C) d_{HP} + (A+B+C) g_{HP} + S_6) / Q_{m25})$$

$$Q_{ch25\%} = 3045.3 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{ch50\%} = (h_{s50} - h_{t50}) + (h_3 - h_2) (1 - ((A+B+C) d_{HP} + (A+B+C) g_{HP} + S_6) / Q_{m50})$$

$$Q_{ch50\%} = 2948.4 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{ch75\%} = (h_{s75} - h_{t75}) + (h_3 - h_2) (1 - ((A+B+C) d_{HP} + (A+B+C) g_{HP} + S_6) / Q_{m75})$$

$$Q_{ch75\%} = 2852 \text{ KJ/Kg}$$

**III.6.11. Calcul de rendement du cycle à chaque charge :**

$$\eta_{cycle} = \frac{(W_t \eta_{mtv}) - [(W_{pex} / \eta_{pex}) + (W_{pa} / \eta_{pa})]}{Q_{ch} / \eta_{ch}}$$

$$\eta_{cy25\%} = 34.19\%$$

$$\eta_{cycle} = \frac{(W_t \eta_{mtv}) - [(W_{pex} / \eta_{pex}) + (W_{pa} / \eta_{pa})]}{Q_{ch} / \eta_{ch}}$$

$$\eta_{cy50\%} = 37.19\%$$

$$\eta_{cycle} = \frac{(W_t \eta_{mtv}) - [(W_{pex} / \eta_{pex}) + (W_{pa} / \eta_{pa})]}{Q_{ch} / \eta_{ch}}$$

$$\eta_{cy75\%} = 38.12\%$$

La courbe ci dessous représente le rendement du cycle en fonction de chaque charge du fonctionnement.



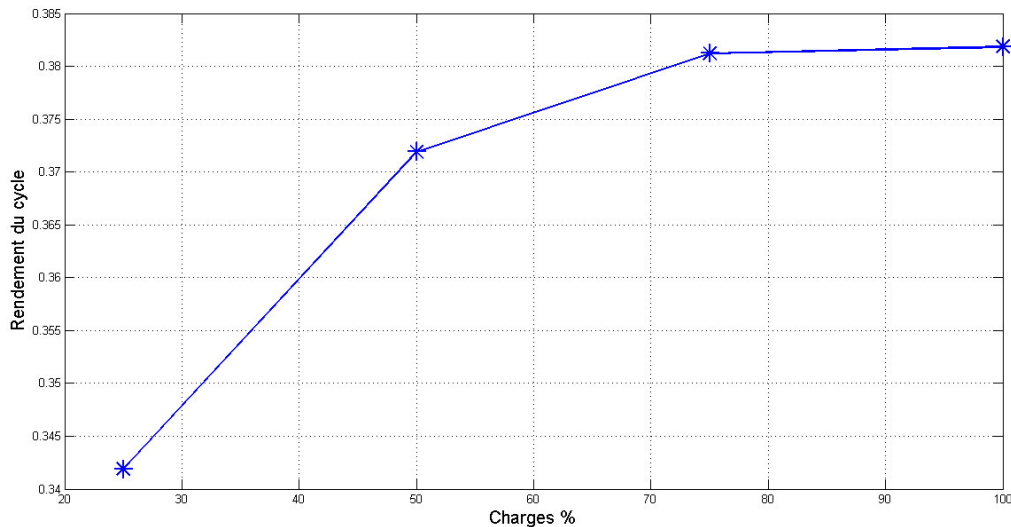


Figure III.7: le rendement du cycle actuel d'un groupe.

On constate que le rendement du cycle à vapeur actuel pour un groupe augmente en fonction des charges données en pourcentage. Pour une charge de 25% qui est la charge minimale que peut atteindre le cycle, le rendement est de 34.19%. Tandis qu'à 50% de charge, le rendement s'élève à 37.19%. Ainsi que pour 75% à un rendement de 38.12% pour atteindre la valeur maximale qui est de 38.19 % en plein charge (100% charge). Cette variation de rendement est liée à la puissance électrique au borne alternateur (selon la demande du réseau).

### III.6.12. Calcul de rendement global de la centrale de Cap Djinet à chaque charge :

Notre travail se base sur 3 groupes de la centrale cependant le groupe 4 est en arrêt.

$$\eta_{\text{global100\%}} = P_u / P_{\text{int}} \quad \text{avec: } P_u = Q_m \cdot W_T \text{ en KW et } P_{\text{int}} = Q_m \cdot Q_{\text{ch}} \text{ en KW}$$

$$\eta_{\text{global100\%I}} = 3 \cdot P_u / 3 \cdot P_{\text{int}} = (3 \cdot 172350) / (3 \cdot 461740) = \mathbf{37.31\%}$$

$$\eta_{\text{global75\%}} = (3 \cdot 129470) / (3 \cdot 347240) = \mathbf{37.29\%}$$

$$\eta_{\text{global50\%}} = (3 \cdot 86441) / (3 \cdot 238440) = \mathbf{36.25\%}$$

$$\eta_{\text{global25\%}} = (4 \cdot 42043) / (4 \cdot 128470) = \mathbf{32.73\%}$$

### III.1.6.13. Calcul de rendement du cycle à vapeur liée au cycle à gaz:

$$\eta_{TG} = P_u / P_{int} \quad ; \quad \eta_{TG} = 249400 / 649479 \quad ; \quad \eta_{TG} = 38.4\%$$

$$\eta_{TGV \ 100\%} = (P_u TG + 3 * P_u) / (P_{int} TG + 3 * P_{int})$$

$$\eta_{TGV \ 100\%} = (249400 + 3 * 172350) / (649479 + 3 * 462000)$$

$$\eta_{TGV \ 100\%} = 37.66\%$$

$$\eta_{TGV \ 75\%} = (P_u GT + 3 * P_u) / (P_{int} GT + 3 * P_{int})$$

$$\eta_{TGV \ 75\%} = (249400 + 3 * 129470) / (649479 + 3 * 347240)$$

$$\eta_{TGV \ 75\%} = 37.7\%$$

$$\eta_{TGV \ 50\%} = (P_u GT + 4 * P_u) / (P_{int} GT + 4 * P_{int})$$

$$\eta_{TGV \ 50\%} = (249400 + 3 * 86441) / (649479 + 3 * 238440)$$

$$\eta_{TGV \ 50\%} = 37.27\%$$

$$\eta_{TGV \ 25\%} = (P_u GT + 4 * P_u) / (P_{int} GT + 4 * P_{int})$$

$$\eta_{TGV \ 25\%} = (249400 + 3 * 42043) / (649479 + 3 * 128740)$$

$$\eta_{TGV \ 25\%} = 36.29\%$$

La courbe suivante donne la variation de rendement globale de la centrale à vapeur actuelle et la centrale avec une TAG.

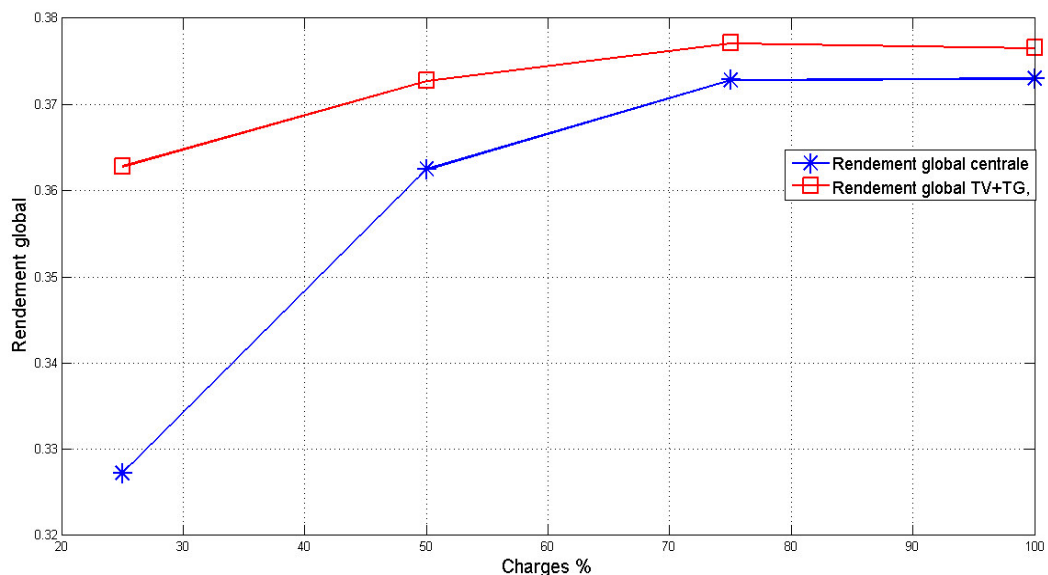


Figure III.8: Courbes du rendement global de la centrale (TV+TG) et de la centrale actuelle en fonction des différentes charges.

On voit que le rendement global augmente dans le cas de 25% et 50% de charge, à des valeurs de **36.29%** et **37.27%** respectivement pour le cycle à TV+TG par rapport au cycle à TV seulement qui le rendement est de **32.73%** et **36.25%**.

Ainsi que pour 75% et 100% de charge, le rendement du cycle à TV+TG par rapport au cycle à TV seulement est de **37.7%** et **37.66%** à **37.7%** et **37.66%** respectivement.

Alors, on remarque qu'on ajoute une TG à l'ancienne centrale influence légèrement sur le rendement global de la centrale, Ce qui permet d'avoir une puissance électrique plus intéressante.

### III.7.Calcul de rendement d'un seul groupe lié à la nouvelle installation à chaque charge :

Cette figure représente le principe de fonctionnement de la nouvelle installation.

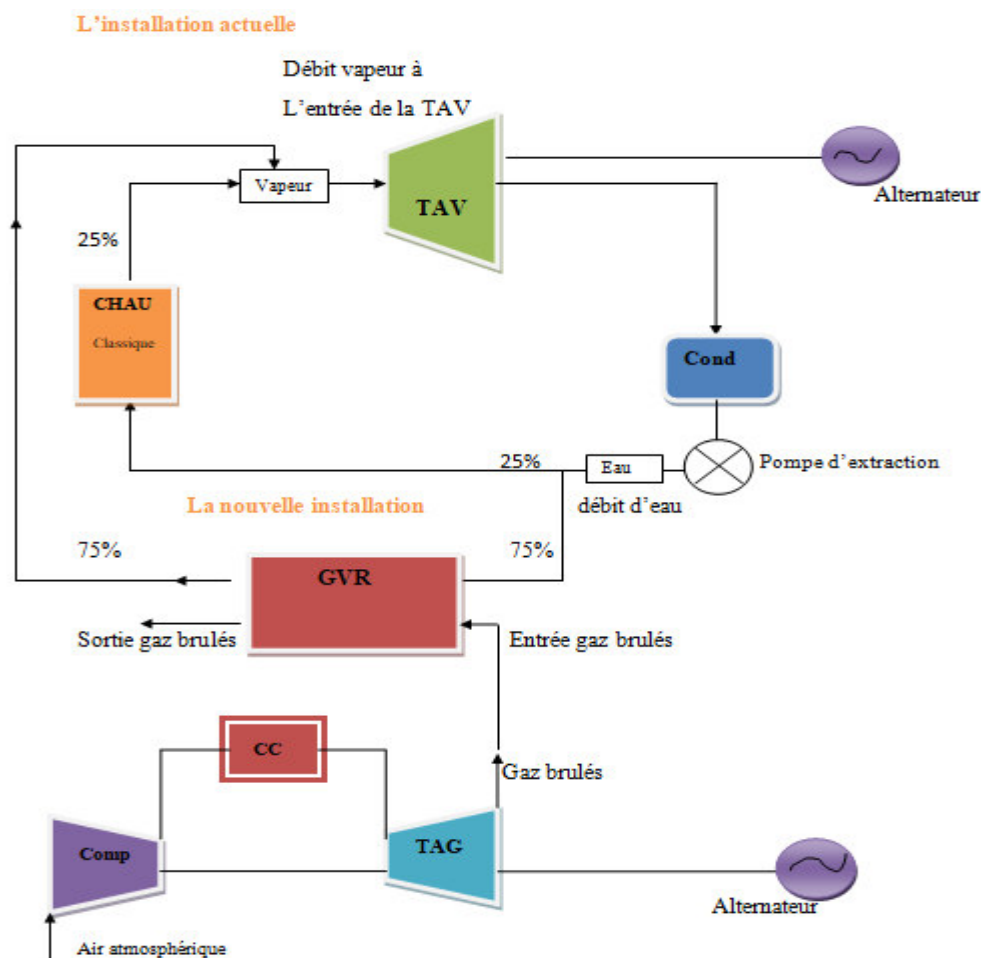


Figure III.9 schéma simplifié de la nouvelle installation

### III.7.1. Calcul de la puissance introduite en présence de GVR pour un groupe à chaque charge :

**\* Si le GVR produit 75 % de la vapeur surchauffée:**

$$P_{int25\%} = Q_{ch25\%} / \eta_{chau} * (Q_m - Q_{HRSG}) = 3045.7 / 0.86 * (145.34 - 108.76)$$

$$P_{int25\%} = 129548.49 \text{ KW}$$

**\* Si le GVR produit 50 % de la vapeur surchauffée:**

$$P_{int50\%} = Q_{ch50\%} / \eta_{chau} * (Q_m - Q_{HRSG} / 2) = 2948.4 / 0.86 * (145.3 - 54.38)$$

$$P_{int50\%} = 311844.72 \text{ KW}$$

**\* Si le GVR produit 25 % de la vapeur surchauffée:**

$$P_{int75\%} = Q_{ch75\%} / \eta_{chau} * (Q_m - Q_{HRSG} / 3) = 2852.4 / 0.86 * (145.34 - 36.25)$$

$$P_{int75\%} = 361823.62 \text{ KW}$$

Donc le rendement est :

**\* Si le GVR produit 75 % de la vapeur surchauffée:**

$$\eta_{NI,grp25\%} = (P_{uTG} + P_{uTV}) / (P_{intTG} + P_{intTV})$$

$$\eta_{NI,grp25\%} = (249400 + 172190) / (649479.16 + 129548.49)$$

$$\eta_{NI,grp25\%} = 54.20 \%$$

**\* Si le GVR produit 50 % de la vapeur surchauffée:**

$$\eta_{NI,grp50\%} = (P_{uTG} + P_{uTV} / P_{intTG} + P_{intTV}) = (249400 + 172190) / (649479.16 + 311844.72)$$

$$\eta_{NI,grp50\%} = 43.89 \%$$

**\* Si le GVR produit 25 % de la vapeur surchauffée:**

$$\eta_{NI,grp75\%} = (P_{uTG} + P_{uTV}) / (P_{intTG} + P_{intTV}) = (249400 + 172190) / (649479.16 + 361823.62)$$

$$\eta_{NI,grp75\%} = 41.72 \%$$

Comme le montre cette courbe la variation de rendement de la nouvelle installation en fonction des charges pour un groupe.

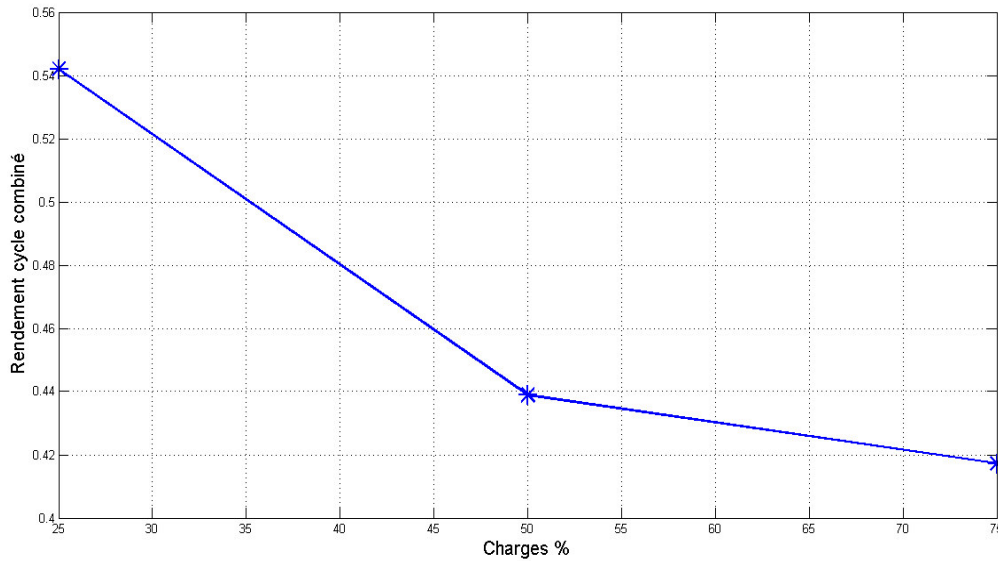


Figure III.10 : Rendement du groupe transformé en fonction des charges.

La transformation consiste à mener un pourcentage de vapeur depuis le GVR (la valeur maximale est de 75%) au groupe fonctionnant aux différentes charges de vapeur produite depuis la chaudière classique, en gardant les mêmes conditions du flux (pression 140 bar et température 540°C).

-le groupe fonctionnant à seulement 25% de charge, on lui transmet tout le débit de vapeur produit par le GVR (75% de vapeur d'eau), ce qui va augmenter le rendement de 38.19% à 54.20%.

-pour un groupe de 50% de charge partielle, on envoie 50% de la vapeur d'eau produite par le GVR, son rendement augmente de 37.19% à 43.93%, et le reste (25%) se distribue à un autre groupe dont la charge est à 75%, cependant le rendement de ce groupe augmente assez légèrement en se variant de 38.12% à 41.72%.

De là, on conclut que la distribution du premier cas est considérée comme la meilleure.

**III.7.2.Influence de la nouvelle installation sur le rendement global de la centrale:**

Notre étude dans la nouvelle installation consiste à faire le calcul de possibilité de distribuer la vapeur de GVR sur les trois groupes :

**✓ 1<sup>er</sup> cas : distribution à un seul groupe :**

$$R_{g_{Nv}} = (Pu_{TG} + 3 * Pu_{100\%}) / (Pint_{TG} + Pint_1 + 2 * Pint_{100\%})$$

Tel que :  $Pint_1 = Q_{ch25\%} * (Q_m - Q_{GVR})$  et  $Q_{GVR} = 108.75 \text{ Kg/s}$ ,  $Q_m = 145.34 \text{ Kg/s}$

Donc :  $R_{g_{Nv}} = 45.03\%$

**✓ 2<sup>eme</sup> cas : distribution à 2 groupes :**

$$R_{g_{Nv}} = (Pu_{TG} + 3 * Pu(1)) / (Pint_{TG} + Pint_2 + 2 * Pint_{100\%})$$

Tel que :  $Pint_2 = Q_{ch25\%} * (Q_m - Q_{GVR} / 2)$

Donc :  $R_{g_{Nv}} = 44.1\%$

**✓ 3<sup>eme</sup> cas : distribution à 3 groupes :**

$$R_{g_{Nv}} = (Pu_{TG} + 3 * Pu(1)) / (Pint_{TG} + Pint_3)$$

Tel que :  $Pint_3 = Q_{ch25\%} * (Q_m - Q_{GVR} / 3)$

Donc :  $R_{g_{Nv}} = 44.2\%$

La figure suivante nous renseigne sur l'influence de la nouvelle installation sur le rendement global de la centrale.

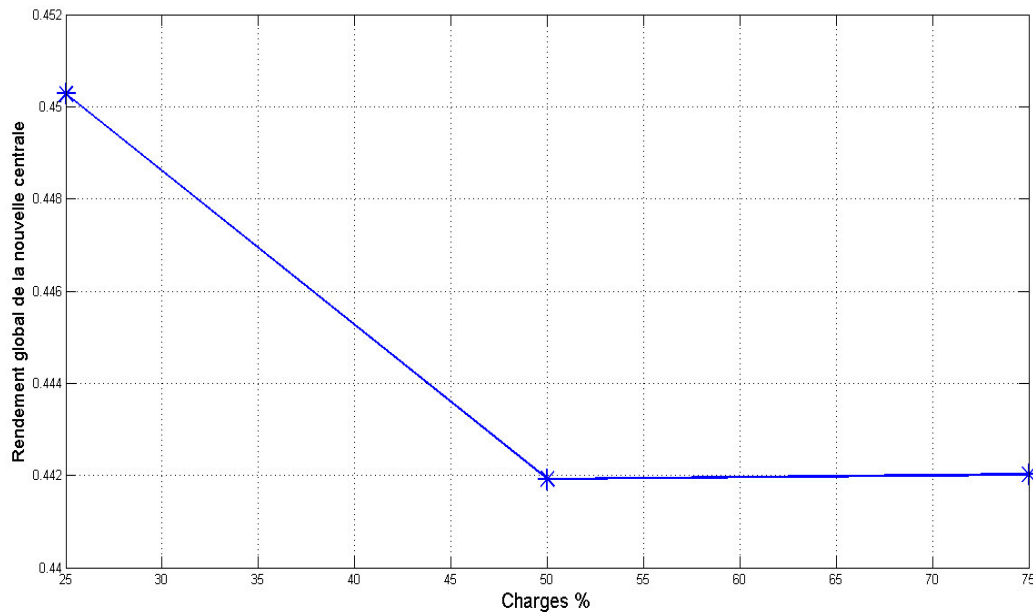


Figure III.11 : rendement global de la nvl inst avec distribution de vapeur à trois groupes

On a voulu voir l'influence de la nouvelle installation sur le rendement global de la centrale. On remarque que la vapeur distribué sur trois groupes à un rendement plus faible que celui dont la vapeur est délivré à un seul groupe, (45.03%,54.20% respectivement).

### III.7.3.La distribution de la vapeur dans les différentes charges (75% 50% 25%) :

La centrale fonctionne à 75% de charge, c'est-à-dire le GVR donne 25% de vapeur pour chaque groupe.

Voila la méthode de calcul :

$$\eta_{\text{global,nv75\%}} = (P_{uTG} + 3 \cdot P_{u100\%}) / (P_{intTG} + 3 \cdot P_{int75\%})$$

$$\eta_{\text{global,nv 75\%}} = 45.32\%$$

$$\eta_{\text{global,nv 50\%}} = (P_{uTG} + P_{u100\%} + P_{u75\%} + P_{u50\%}) / (P_{intTG} + 3 \cdot P_{int50\%})$$

$$\eta_{\text{global,nv 50\%}} = 46.72\%$$

$$\eta_{\text{global,nv 25\%}} = (P_{uTG} + 3 \cdot P_{u50\%}) / (P_{intTG} + 3 \cdot P_{int25\%})$$

$$\eta_{\text{global,nv 25\%}} = 49.16\%$$

La courbe ci-dessous représente la variation de rendement globale de la nouvelle installation avec diminution de charge de tous les groupes.

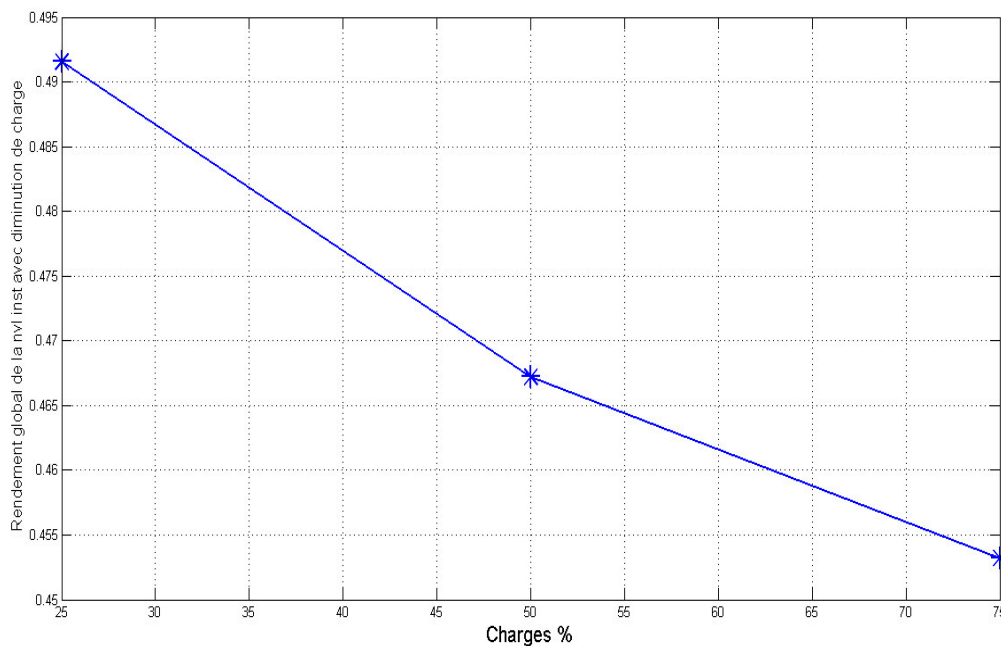


Figure III.12 : rendement global de la nvl inst avec diminution de charge

-1<sup>er</sup> cas : on a pris un fonctionnement de 3 groupes à 25% de charge qui le rendement est de **36.29%**, en faisant la distribution de la vapeur venant du GVR, de façon à délivrer 25% à chaque groupe (75%). On obtient des charges de 50% chaque un à un rendement élevé à **49.19%**.

-2<sup>ème</sup> cas : on a pris les charges de fonctionnement des 3 groupes à 50% à un rendement de **37.19%**, avec un pourcentage distribué de 75% de vapeur produite par le GVR. On aura des charges de 50%, 75% et 100%, ce qui rend le rendement égal à **46.72%**.

-3<sup>ème</sup> cas : on a pris le cas où la charge des trois groupes est de 75% à un rendement de **38.16%**, pour faire la distribution de 25 % vapeur produite à chaque groupe par le GVR (75%), afin d'atteindre la pleine charge. De là, on constate que le rendement c'est amélioré par rapport au cycle vapeur seul, de **45.32%**.

#### III.7.4 .La distribution de la vapeur lors d'un arrêt d'un groupe :

On sait que la centrale actuelle de RDJ rencontre des problèmes au niveau de la chaudière qui mène des fois à l'arrêt de production de vapeur surchauffée pour cela on peut remplacer cette vapeur par celle produite par le GVR.

On prend  $P_{int}=0$ .



La méthode de calcul de ces rendements est :

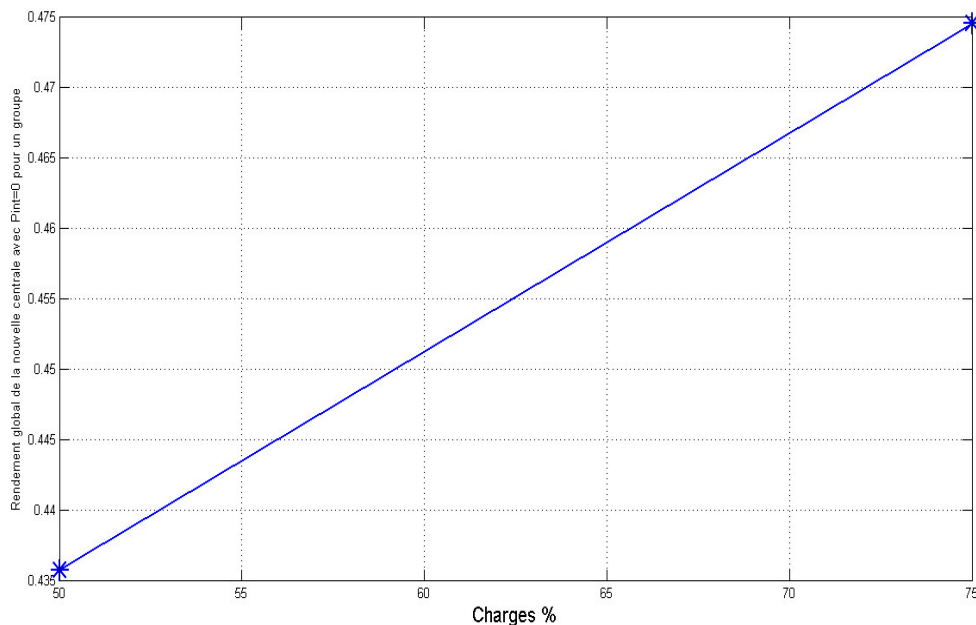
$$\eta_{\text{global}, \text{Pi}0, 75\%} = (\text{Pu}_{\text{TG}} + 3 * \text{Pu}_{75\%}) / (\text{Pint}_{\text{TG}} + 2 * \text{Pint}_{75\%})$$

$$\eta_{\text{global}, \text{Pi}0, 75\%} = 47.46\%$$

$$\eta_{\text{global}, \text{Pi}0, 50\%} = (\text{Pu}_{\text{TG}} + 2 * \text{Pu}_{75\%} + \text{Pu}_{50\%}) / (\text{Pint}_{\text{TG}} + 3 * \text{Pint}_{50\%})$$

$$\eta_{\text{global}, \text{Pi}0, 50\%} = 43.58\%$$

Voila la courbe qui représente le rendement globale de la nouvelle installation si la puissance introduite d'un groupe est nulle.



**Figure III.13:** rendement globale de la nvl inst avec Pint d'un groupe est nulle

-1<sup>er</sup> cas : on a deux groupes qui fonctionnent à 75%, la vapeur du GVR est délivré pour le groupe où la chaudière est en arrêt, pour avoir la même puissance pour les trois groupes et un rendement de **47.96%** au lieu de **38.16%**.

-2<sup>ème</sup> cas : on a deux groupes de 50% charges, chaque un après la distribution produira :

1<sup>er</sup> groupe : 50% de charge

2<sup>ème</sup> groupe : 50% de charge

3<sup>ème</sup> groupe : 75% de charge (supposé en arrêt)

Le rendement du cycle devient **43.58%** au lieu de **37.19%**.

On remarque que la distribution de vapeur à un seul groupe donne de meilleurs résultats par rapport à la distribution à trois groupes, mais on peut dire que dans tout les cas cette dernière influence positivement sur le rendement globale de la centrale.

### III.7.5. Tableau récapitulatif des résultats :

Ce tableau représente les performances de la nouvelle installation et de l'installation actuelle dans les différentes charges de fonctionnement.

| Charge \ performances            | 100%   | 75%          | 50%          | 25%          |
|----------------------------------|--------|--------------|--------------|--------------|
| <b>W<sub>HP</sub> (KJ/Kg)</b>    | 300.31 | 328.27       | 331.94       | 329.95       |
| <b>W<sub>MP</sub> (KJ/Kg)</b>    | 431.11 | 437.09       | 437.68       | 402.77       |
| <b>W<sub>BP</sub> (KJ/Kg)</b>    | 478.74 | 496.35       | 498.59       | 449.77       |
| <b>W<sub>t</sub> (KJ/Kg)</b>     | 1210   | 1261.7       | 1268.2       | 1185.2       |
| <b>W<sub>pex</sub> (KJ/Kg)</b>   | 1.56   | 2.009        | 2.63         | 4.16         |
| <b>W<sub>pa</sub> (KJ/Kg)</b>    | 23.29  | 23.5         | 27.6         | 44.3         |
| <b>Q<sub>ch</sub> (KJ/Kg)</b>    | 2733.3 | 2852         | 2948.4       | 3045.3       |
| <b>η<sub>Cycle</sub> %</b>       | 38.19  | 38.16        | 37.19        | 34.19        |
| <b>P<sub>u</sub> (KW)</b>        | 172350 | 129470       | 86441        | 42043        |
| <b>P<sub>int</sub> (KW)</b>      | 46200  | 347240       | 238440       | 128740       |
| <b>η<sub>global</sub> %</b>      | 37.31  | 37.29        | 36.25        | 32.73        |
| <b>η<sub>TV+TG</sub> %</b>       | 37.66  | 37.7         | 37.27        | 36.29        |
| <b>η<sub>CCgroupe</sub> %</b>    | -----  | <b>41.68</b> | <b>43.85</b> | <b>54.20</b> |
| <b>η<sub>CC Centrale</sub> %</b> | -----  | <b>44.2</b>  | <b>44.1</b>  | <b>45.03</b> |

Tableau III.7 : tableau des résultats

### III.7.6. La puissance totale de la nouvelle installation aux bornes alternateur :

$$P_{nv,ins} = P_{uTG} + P_{uTV} = 421.4 \text{ MW}$$

On remarque qu'avec ces résultats on a amélioré les performances (rendement, puissance) de la centrale de RDJ.

**Conclusion :**

Ce chapitre nous a servis à présenté la description de la nouvelle installation.

A partir des résultats obtenus on conclut que cette dernière permet d'augmenter en particulier le rendement d'un groupe de 38.19 % à 54.20 %.

D'après l'étude de la distribution de vapeur d'eau produite par le GVR, on a sue qu'elle influence sur le rendement global de la centrale de Ras Djinet.

# Chapitre VI

**Etude économique**

**Introduction :**

Parmi les aspects les plus importants pour lancer un projet est le coût autrement dit l'aspect économique.

Le coût de production de l'énergie électrique dans les centrales thermiques à vapeur dépend d'un grand nombre de paramètres liés ; au combustible, aux performances

Souhaités, aux procédés choisis, à l'option technique retenue, aux réglementations...etc.

Dans ce chapitre on fera une étude prenant en compte l'ensemble des paramètres nécessaires pour connaître le coût d'investissement exact pour une centrale thermique donnée.

Nous rappelons que l'investissement est l'acte par lequel une entreprise dépense de l'argent pour gagner plus. Au contraire d'une charge qui est la résultante de l'exploitation, donc un engagement de l'entreprise.

On distingue les investissements matériels (machines, bâtiments....) des investissements

Immatériels (logiciel, licences, brevets....).

La décision d'investissement touche à différents domaines : achat d'équipements, construction d'usine, lancement de nouveau produit, vente de licences pour les industries de pointe....une telle décision s'appuie sur la notion de rentabilité pour rester sur une certaine rationalité, il faut que l'investissement rapporte de l'argent plus qu'il n'en a coûté.

On distingue la rentabilité économique de la rentabilité financière.

Les points exposés ici s'arrêtent à la rentabilité économique qui se mesure par :

- la valeur actuelle nette appelée aussi bénéfice actualisé (net d'impôt).
- le taux de rendement interne.
- le délai de récupération.
- l'indice de rentabilité ou de profitabilité.

### IV.1.Comparaison des consommations spécifique de l'installation actuelle et la nouvelle installation : [30]

On sait que 1 KWh équivalent à 860 Kcals, donc la consommation de la chaleur serait 860 Kcals par Kilowattheure.

Pour le cycle actuel :

$$C_{sp100\%}=860/\eta_{cycle}$$

$$C_{sp100\%}=860/0.3819=2251.89\text{Kcal/KWh}$$

Pour le cycle transformé :

$$C_{sp100\%}=860/\eta_{cycle}$$

$$C_{sp100\%}=860/0.541=1589.35\text{Kcal/KWh}$$

On sait que la centrale de Cap Djinet utilise le gaz naturel comme combustible, une dégradation du rendement à un impact direct sur les dépenses annuel.

#### Remarque :

La chaudière consomme presque 40000 m<sup>3</sup>/h à pleine charge, et dans notre cas elle va consommer 13000m<sup>3</sup>/h à 25% de charge et la turbine à gaz va consommer 0.05m<sup>3</sup>/h. Donc la consommation du gaz diminue, ce qui nous permet de bénéficier plus avec un rendement du cycle meilleur.

### IV.2.Les composantes de l'investissement :

On peut citer sept composantes :

#### IV.2.1.Le coût « I » :

Il mesure de la dépense ou l'appauvrissement d'un agent économique associé à évènement ou une action de nature économique. Il s'exprime également sous forme d'un ou d'une valeur monétaire.

La dépense d'investissement peut être effectuée en une seule fois ou être étalée dans le temps.  $I_0, I_1, \dots, I_n$  (représentent les investissements de l'année 0 à la n<sup>ème</sup> année).

**IV.2.2.Les dépenses d'exploitation (frais de fonctionnement) :**

Ce sont les dépenses inhérentes à l'activité d'une entreprise à l'exclusion

Des investissements. Incluent les frais directs (main d'œuvre, matière première)

Et les frais indirects tels les stocks supplémentaire.

Les dépenses d'exploitation de la transformation en cycle combiné.

**IV.2.3.Les recettes:**

Est la somme d'argent encaissée (reçue) à la suite d'une opération le plus souvent commerciale. Par extension, le terme désigne les mouvements financiers entrants. On oppose les recettes aux dépenses.

Étalées dans le temps par année, elles sont données par la relation suivante :

$$R = q \times n \times T \times J \times C$$

Avec :

q: la puissance électrique produite à la borne de l'alternateur du cycle combiné.

n : nombre d'heures par journée (24 heures).

J : nombre de jour par année (365 jours).

T : taux d'actualisation de la puissance maximal (0,75).

C : coût du gaz naturel pour 1KWh

Coût du gaz naturel = 0.1078 Da/th (Dinar /Thermie)

- **La recette annuelle de la centrale de Cap Djinet :**

1 Thermie → 1.163 KWh

$$\Rightarrow C = 0.0926 \text{ DA/KWh}$$

$$\text{Recette} = 172000 \times 365 \times 24 \times 0.75 \times 0.0926 \quad \Rightarrow \quad R = 104641704 \text{ DA}$$

On aura une recette estimé à 104641704 DA

- **La recette annuelle de la centrale transformée :**

1 Thermie → 1.163 KWh

$$\Rightarrow C = 0.0926 \text{ DA/KWh}$$

$$\text{Recette} = 419400 \times 365 \times 24 \times 0.75 \times 0.0926 \quad , \quad R = 255155410.8 \text{ DA}$$

On aura une recette estimé à : 255155410.8DA /an

- **Le gain en coût pour la nouvelle installation :**

[Recette de nouvelle installation-Recette de l'installation actuelle]

Gain= (255155410.8-104641704).

Gain=150513706.8 DA/an.

#### **IV.2.4.L a durée de vie de la centrale :**

Elle est théoriquement estimée à 40 ans, avec une durée de vie restante de 10ans.

#### **IV.2.5.Le Cash-Flow Cf :[31]**

C'est la différence entre sortie et entrée d'argent.

Le cash-flow totalise l'ensemble des flux de trésorerie générés par les activités d'une société. Cet indicateur permet de mesurer la marge réelle d'une entreprise, sa capacité à financer son développement (ses investissements notamment) à partir de son exploitation, ainsi que la masse des dividendes qu'elle peut servir à ses actionnaires.

#### **IV.2.6.La valeur résiduelle : [32]**

En économie, la valeur résiduelle détermine la valeur d'un bien à l'expiration de sa durée d'utilisation ou de location. Lorsqu'elle concerne un bien immobilier mis en location, la valeur résiduelle correspond par exemple au montant dont devra s'acquitter le locataire du bien s'il veut prétendre acquérir le logement à l'issue de sa période de location. La valeur résiduelle sert ainsi plus largement à définir la valeur d'un bien lorsque sa période d'amortissement arrive à échéance. Dans notre cas la  $V_r$  est nulle.

#### **IV.2.7.Le taux d'actualisation « i » :**

Une somme  $S_0$  placée à un taux  $i$  vaudra, au bout de  $n$  années (10 années)

$$S_n = S_0 (1+i)^{-n}$$

Dans notre cas les valeurs des sommes sont égales aux valeurs de Cf. durant les 10ans. Les données de chaque composante de l'investissement sont résumées dans le tableau suivant :



| Les composantes de l'investissement    | Coût         |
|----------------------------------------|--------------|
| coût d'investissement «I» (TAG et GVR) | 48 MDA       |
| puissance électrique «q»               | 419.4MW      |
| coût du gaz naturel                    | 0.1078 Da/Th |
| Casch flow « Cf »                      | 12 MDA       |
| taux d'actualisation« i »              | 12%          |

**Tableau IV.1 : les données des composantes de l'investissement**

### IV.3.Etude de la rentabilité du projet :

#### IV.3.1.Calcul du bénéfice actualisé ou valeur actuelle nette par la méthode du cash-flow :[33]

Valeur actuelle nette : on appelle valeur actuelle nette d'un projet (revenu actualisé, bénéfice actualisé ou nette present value) la somme algébrique des valeurs actualisé de chaque 'un des flux de trésorerie associés au projet, elle est l'unique critère d'acceptation ou de rejet d'un projet unique, indépendant de tout autre projet.

L'expression donnant la vanne actuelle nette (bénéfice actualisé) par la méthode du cash-flow est :

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+i)^t} + \frac{Vr}{(1+i)^n} - I \quad \text{VAN : bénéfice actualisé.}$$

t: nombre d'année (t=1,2,...,10)

Vr : valeur résiduelle en fin de période qui est nulle dans notre cas.

I : le cout global de l'investissement.

i : taux d'actualisation 12%.

Cf : cash-flow est considéré comme constant au bout de 10 ans avenir.

Cf= Encaissement - Décaissement

L'encaissement est estimé à 25MDA, et le décaissement est estimé à 13MDA.

$B_a = 8.502 \text{ MDA}$  dans ce cas :  $VAN > 0$

Donc le projet est acceptable, investissement étant considéré comme rentable.

**IV.3.2. Le taux de rentabilité interne TRI :**

C'est un taux d'actualisation qui annule la valeur actuelle nette d'une série de flux financiers ;  
il s'obtient à partir de l'égalité suivante :

Cf : désignant le cash-flow durant les 10 ans.

I : total des charges d'investissement.

Soit :  $Cf(1+TRI)^{-1} + Cf(1+TRI)^{-2} + \dots + Cf(1+TRI)^{-10} = I$

Une méthode itérative permet d'aboutir exactement à la valeur cherchée, en essayant plusieurs taux jusqu'à atteindre celui qui rend égaux les deux membres de l'équation, en partant d'une valeur arbitraire  $i$ , comme illustré dans les tableaux suivants.

| année | Cash-flow Cf<br>(MDA) | Pour<br>TRI=12%<br>$Cf/(1+0.12)^n$<br>(MDA) | Pour<br>TRI=16%<br>$Cf/(1+0.16)^n$<br>(MDA) | Pour<br>TRI=17%<br>$Cf/(1+0.17)^n$<br>(MDA) |
|-------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1     | 12                    | 10.71                                       | 10.34                                       | 10.25                                       |
| 2     | 12                    | 9.56                                        | 8.91                                        | 8.76                                        |
| 3     | 12                    | 8.54                                        | 7.68                                        | 7.49                                        |
| 4     | 12                    | 7.62                                        | 6.62                                        | 6.40                                        |
| 5     | 12                    | 6.80                                        | 5.71                                        | 5.47                                        |
| 6     | 12                    | 6.07                                        | 4.92                                        | 4.67                                        |
| 7     | 12                    | 5.42                                        | 4.24                                        | 3.99                                        |
| 8     | 12                    | 4.84                                        | 3.66                                        | 3.41                                        |
| 9     | 12                    | 4.32                                        | 3.15                                        | 2.92                                        |
| 10    | 12                    | 3.86                                        | 2.72                                        | 2.49                                        |
| Total |                       | 56.50                                       | 48.33                                       | 46.58                                       |

**Tableau IV.2: Détermination du Taux de Rendement Interne TRI pour la centrale transformée**

Le montant de l'investissement  $I = 48$  MDA étant compris entre 48.33 MDA et 46.58MDA, le taux de rendement interne sera situé entre 16 % et 17%. Nous effectuons une interpolation pour avoir la valeur exacte.

D'où : le taux du rendement interne TRI= 16.18%

### IV.3.3. Le délai de récupération DR : ou temps de retour simple TRS

Le délai de récupération permet de connaître le nombre de périodes nécessaires à la récupération d'un investissement. Il mesure le temps nécessaire à la récupération du montant initial d'un investissement en mois ou années, en le comparant aux flux cumulés de trésorerie.

Il correspond à l'année pour laquelle le bénéfice actualisé net d'impôt devient supérieur au coût d'investissement. On a donc :

$$\sum_{t=1}^{DR} \frac{CF}{(1+i)^t} + \frac{Vr}{(1+i)^n} > I$$

D'où DR représente le délai de récupération.

Et la Vr (valeur résiduelle) est nulle.

Le tableau suivant représente les valeurs de  $CF/(1+0,12)^n$  et  $CF/(1+0,12)^n$  cumulé en MDA :

| Année | $CF/(1+0,12)^n$ (MDA) | $CF/(1+0,12)^n$ cumulé (MDA) |
|-------|-----------------------|------------------------------|
| 1     | 10.71                 | 10.71                        |
| 2     | 9.56                  | 20.27                        |
| 3     | 8.54                  | 28.81                        |
| 4     | 7.62                  | 36.43                        |
| 5     | 6.80                  | 43.23                        |
| 6     | 6.07                  | 49.3                         |
| 7     | 5.42                  | 54.72                        |
| 8     | 4.84                  | 59.56                        |
| 9     | 4.32                  | 63.88                        |
| 10    | 3.86                  | 67.74                        |

**Tableau IV.3: Valeurs de  $Cf/(1+0,12)^n$  et  $Cf/(1+0,12)^n$  cumulé**

On peut recourir ici aussi à une interpolation pour trouver le temps exact nécessaire pour rembourser le coût d'investissement.

Pour  $I = 48$  MDA, on aura  $DR = 5.78$  ans

Ce qui correspond à un délai de récupération de 5 ans 9mois.

|                                           | Nouveau cycle     |
|-------------------------------------------|-------------------|
| Le coût du gaz naturel<br>pour 1KWh « C » | 0.0926 DA/KWh     |
| La recette « R »                          | 255155410.8DA /an |
| Ba                                        | 8.502MDA          |
| TRI                                       | 16.18%            |
| DR                                        | 5.78ans           |

**Tableau IV.4 : tableau des résultats**

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons effectué l'étude économique de l'investissement de **L'hybridation de la centrale de Ras-Djanet avec un cycle à gaz**, et avec les résultats que nous avons obtenus prouvent que ce projet est acceptable ; Autrement dit l'investissement est considéré comme rentable.

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

La production de l'énergie électrique dans les centrales thermique est tout simplement une conversion d'énergie chimique en énergie mécanique puis en énergie électrique .L'évaluation et le contrôle de cette transformation nous permettent de profiter le maximum possible sur le plans énergétique et économique.

C'est ainsi que, le cycle combiné permet de récupérer la chaleur rejetée par une turbine à gaz qui se trouve à une température plus élevé.

A cet effet, notre étude a porté sur les deux principaux points suivants :

Une étude énergétique et une étude économique, portant toutes les deux sur la modification de la centrale actuelle.

Les principales conclusions de notre étude sont :

Au point de vue performance énergétique, l'hybridation de la centrale avec un cycle à gaz permet d'augmenter la puissance d'une tranche de 175 MW à environs 420M, et d'augmenter le rendement de 38.19% à 54.20%.Aussi, de diminuer la consommation du combustible (gaz naturel) de 40 000 Nm<sup>3</sup>/h à 13 000 Nm<sup>3</sup>/h.

Suit au déclassement de la centrale de Cap-Djinet, les chaudières rencontrent des problèmes de percement au niveau des conduites de vapeur, à pression et température très élevés(P=160bar, T=540°C), il été préférable de faire la distribution de vapeur surchauffée produite par le GVR sur les trois groupes de la centrale actuelle suivant un système de tuyauterie et des vannes régulatrices pour gérer cette distribution , cela nous permettra de baisser les charges de fonctionnement des groupes, et donc la pression diminuera à environs 140bar afin d'avoir les mêmes conditions de vapeur à l'entrée de la turbine à vapeur.

Les résultats calculés ont été confirmé par un logiciel de calcul « Matlab », qui permet de calculer facilement les rendements globaux à chaque charge et d'avoir les graphes représentatifs.

Ce choix de distribution de vapeur surchauffée produite par le GVR fait de part que les groupes de la centrale ne seront pas à l'arrêt, sauf si la TG et le GVR ont connu des problèmes (des pannes).dans ce cas la centrale fonctionnera à cycle à vapeur seulement, et vise versa.

## Conclusion générale

---

Le résultat de notre projet de fin d'étude montre que la nouvelle installation est une solution technique et économique au même temps et s'inscrit dans le cadre d'une gestion intelligente surtout en gardant les chaudières classiques de la centrale.

En fin cette étude a été pour nous un grand champ d'application des connaissances théoriques que nous avons acquis durant notre formation. Par ailleurs, elle nous a permis d'être en contact de la réalité industrielle.

### Définition de logiciel Matlab :

Avant toute chose, il est important de définir ce qu'est MATLAB. Pour certains, c'est un logiciel, un outil, pour d'autres un langage.

En fait, c'est un peu tout cela.

- lorsque l'on parle du logiciel MATLAB, on fait référence à l'outil que l'on utilise, l'interface utilisateur.
- lorsque l'on parle du langage MATLAB, on désigne la syntaxe spécifique que l'on met en œuvre dans cet outil.

Le nom MATLAB vient de l'anglais *MATrix LABoratory*. Une traduction littérale nous amène à voir MATLAB comme un laboratoire pour manipuler des matrices. Nous reviendrons sur ce point, qui est un élément fondamental du langage MATLAB : la plupart des fonctions définies dans MATLAB le sont pour des grandeurs matricielles, et par extension, pour des données tabulées.

MATLAB est un langage de programmation de quatrième génération et un environnement d'analyse numérique.

Les ingénieurs et les scientifiques utilisent MATLAB dans de nombreux domaines, tels que le traitement des images et des signaux, les communications, les systèmes de contrôle du secteur industriel, la conception de réseaux intelligents, la robotique et la finance computationnelle.

### Annex1 :

```
P(1)=16.8;T(1)=33;
% pertes de pression et de température
PB=25;PM=55;PH=175;dTB=0.1;dTM=1.1;dTH=2.9 ;
P(16)=138.2;T(16)=535;
P(2)=PB+0.5;T(2)=T(1)+dTB;
P(3)=P(2)-0.5;
TB=XSteam('TSat_p',PB);
T(3)=(T(2)+TB)/2;
T(4)=TB;T(5)=TB;T(6)=TB;P(4)=PB;P(5)=PB;P(6)=PB;
P(7)=PB+0.5;T(7)=T(6)+dTB;
TM=XSteam('TSat_p',PM);
T(8)=(T(7)+TM)/2;
T(9)=TM;T(10)=TM;T(11)=TM;P(8)=PM;P(9)=PM;P(10)=PM;P(11)=PM;
P(12)=PM+0.5;T(12)=TM+dTM;
TH=XSteam('TSat_p',PH);
P(13)=P(12);P(14)=PH;T(13)=TH;T(14)=TH;
P(15)=PH-0.5;T(15)=T(16)+dTH;
```



### Annex2 :

```
XSteam('h_pt',145.6,540)
ans =
    3.4281e+003
>> XSteam('h_pt',138.2,535)
ans =
    3.4227e+003
>> XSteam('h_pt',40,357.2)
ans =
    3.1112e+003
>> XSteam('h_pt',35.9,535)
ans =
    3.5300e+003
>> XSteam('h_pt',16.50,423.7)
ans =
    3.3055e+003
>> XSteam('h_pt',5.52,282.2)
ans =
    3.0264e+003
>> XSteam('h_pt',1.86,173.2)
ans =
    2.8174e+003
>> XSteam('h_pt',0.669,88.78)
ans =
    2.6576e+003
>> XSteam('h_pt',0.166,56.15)
ans =
    2.6021e+003
>> XSteam('h_pt',0.05,32.9)
ans =
```

## Annexes

---

NaN

```
>> XSteam('h_pt',0.05,32.88)
```

```
ans =
```

NaN

```
>> XSteam('h_pt',16.8,33)
```

```
ans =
```

139.7992

```
>> XSteam('h_pt',8.86,37.6)
```

```
ans =
```

158.2957

```
>> XSteam('h_pt',8.86,38.2)
```

```
ans =
```

160.8017

```
>> XSteam('h_pt',8.86,38.80)
```

```
ans =
```

163.3077

```
>> XSteam('h_pt',8.371,40.3)
```

```
ans =
```

169.5294

```
>> XSteam('h_pt',7.881,52.10)
```

```
ans =
```

218.7795

```
>> XSteam('h_pt',7.39,84.5)
```

```
ans =
```

354.3815

```
>> XSteam('h_pt',6.9,113.39)
```

```
ans =
```

476.1062

```
>> XSteam('h_pt',4.939,151.40)
```

```
ans =
```

## Annexes

---

```
2.7476e+003

>> XSteam('h_pt',177,154.3)

ans =

    661.3869

>> XSteam('h_pt',176.02,200.39)

ans =

    861.0115

>> XSteam('h_pt',175.04,246.3)

ans =

    1.0689e+003

XSteam('s_pt',6.9,113.39)

ans =

    1.4555

>> XSteam('s_pt',145.6,540)

ans =

    6.508

>> XSteam('s_pt',138.2,535)

ans =

    6.5233

>> XSteam('s_pt',40,357.2)

ans =

    6.6128

>> XSteam('s_pt',35.9,535)

ans =

    7.2469

>> XSteam('s_pt',16.50,423.7)

ans =

    7.2993

>> XSteam('s_pt',5.52,282.2)

ans =

    7.3486

>> XSteam('s_pt',1.86,173.2)

ans =
```

## Annexes

---

```
7.4252
>> XSteam('s_pt',0.669,88.78)
ans =
7.4945
>> XSteam('s_pt',0.166,56.15)
ans =
7.9722
>> XSteam('s_pt',0.05,32.9)
ans =
NaN
>> XSteam('s_pt',16.8,33)
ans =
0.4774
>> XSteam('s_pt',8.86,37.6)
ans =
0.5400
>> XSteam('s_pt',8.86,38.8)
ans =
0.5561
>> XSteam('s_pt',8.86,38.2)
ans =
0.5480
>> XSteam('s_pt',8.371,40.3)
ans =
0.5761
>> XSteam('s_pt',7.881,52.10)
ans =
0.7305
>> XSteam('s_pt',7.39,84.5)
ans =
1.1281
>> XSteam('s_pt',6.9,113.39)
ans =
1.4555
>> XSteam('s_pt',177,154.3)
XSteam('s_pt',176.02,200.39)
```

## Annexes

```
ans =  
2.3101  
ans =  
1.8664  
>> XSteam('s_pt',175.04,246.3)  
ans =  
2.7292
```

### Annex3 :

```
%clc clear;  
% i=1--100%      i=2--75%      i=3--50%      i=4--25%  
Rmt=0.98;% Rendement mécanique turbine à vapeur  
Rpe=0.78;% Rendement mécanique pompe d'extraction  
Rpa=0.775;% Rendement mécanique pompe d'alimentation  
Rch=0.86;% Rendement de la chaudière  
  
%débits vapeur en kg/s  
Qm(1)=145.340;Qm(2)=104.71;Qm(3)=69.55;Qm(4)=36.28;  
Qm3(1)=129.96;Qm3(2)=94.676;Qm3(3)=63.614;Qm3(4)=31.624;  
%Qm4(1)=1.158;débit d'eau d'injection pour la désurchauffe des  
resurchauffeurs  
  
% débits soutirages en kg/s  
s1(1)=2.405;s2(1)=6.460;s3(1)=5.987;s4(1)=7.336;s5(1)=10.012;s6(1)=13.674;s6s(1)=4.230;  
s1(2)=1.301;s2(2)=4.433;s3(2)=4.104;s4(2)=4.886;s5(2)=6.989;s6(2)=8.783;s6s(2)=4.230;  
s1(3)=0.448;s2(3)=2.749;s3(3)=2.561;s4(3)=2.939;s5(3)=4.327;s6(3)=5.090;s6s(3)=4.230;  
s1(4)=0.000;s2(4)=1.034;s3(4)=1.205;s4(4)=2.036;s5(4)=1.087;s6(4)=4.23;s6s(4)=4.230;  
  
% débits fuites HP en kg/s  
  
Agh(1)=0.672;Bgh(1)=0.201;Cgh(1)=0.006;Adh(1)=0.660;Bdh(1)=0.153;Cdh(1)=0.005;DH=4.47;  
Agh(2)=0.449;Bgh(2)=0.147;Cgh(2)=0.006;Adh(2)=0.490;Bdh(2)=0.112;Cdh(2)=0.005;  
Agh(3)=0.340;Bgh(3)=0.094;Cgh(3)=0.006;Adh(3)=0.334;Bdh(3)=0.072;Cdh(3)=0.005;  
Agh(4)=0.180;Bgh(4)=0.037;Cgh(4)=0.006;Adh(4)=0.175;Bdh(4)=0.028;Cdh(4)=0.005;%Ddh(1)=4.47;  
% débits fuites MP en kg/s  
Bgm(1)=0.417;Cgm(1)=0.024;Bdm(1)=0.552;Cdm(1)=0.032;  
Bgm(2)=0.295;Cgm(2)=0.024;Bdm(2)=0.391;Cdm(2)=0.032;  
Bgm(3)=0.184;Cgm(3)=0.024;Bdm(3)=0.243;Cdm(3)=0.032;  
Bgm(4)=0.054;Cgm(4)=0.024;Bdm(4)=0.085;Cdm(4)=0.032;  
% débits fuites BP en kg/s  
Bgb(1)=0.109;Cgb(1)=0.022;Bdb(1)=0.109;Cdb(1)=0.022;  
Bgb(2)=0.110;Cgb(2)=0.022;Bdb(2)=0.110;Cdb(2)=0.022;  
Bgb(3)=0.111;Cgb(3)=0.023;Bdb(3)=0.111;Cdb(3)=0.023;  
Bgb(4)=0.112;Cgb(4)=0.023;Bdb(4)=0.112;Cdb(4)=0.023;  
  
%débits des fuites récupérées en kg/s  
Qr(1)=0.097;Qr(2)=0.097;Qr(3)=0.097;Qr(4)=0.097;%Pompe d'extraction
```

## Annexes

```

Admr(1)=1.392;Admr(2)=0.989;Admr(3)=0.674;Admr(4)=0.355;%turbine basse
pression
%débits gaz en kg/s
Qgaz(1)=8.88;Qgaz(2)=6.86;Qgaz(3)=4.69;Qgaz(4)=2.88;
%pouvoir calorifique supérieur en kj/kg
PCS=50444.8;
%enthalpies entrée/sortie chaudière
hs(1)= 3428.1;hs(2)=3418.8;hs(3)=3405.8;hs(4)=3369.7;
h22(1)=1069.35;h22(2)=995.5;h22(3)=901.5;h22(4)=771.4;
%enthalpies entrée/sortie turbines
h1(1)=3421.81;h2(1)=3113.6;h3(1)=3529.44;h4(1)=3304.18;h5(1)=3027.2;
h6(1)=2817.67;h7(1)=2652.16;h8(1)=2464.6;h9(1)=2364.8;h10(1)=137.8;h11(1)=1
39.9;
h19(1)=638.24;h20(1)=661.35;
h1(2)=3409.3;h2(2)=3064.3;h3(2)=3538.2;h4(2)=3314.8;h5(2)=3034.3;
h6(2)=2823.7;h7(2)=2657.3;h8(2)=2471.0;h9(2)=2369.4;h10(2)=124.5;h11(2)=127
.0;
h19(2)=591.4;h20(2)=614.9;
h1(3)=3394.0;h2(3)=3037.0;h3(3)=3522.6;h4(3)=3302.1;h5(3)=3025.2;
h6(3)=2816.4;h7(3)=2652.0;h8(3)=2468.9;h9(3)=2377.9;h10(3)=112.3;h11(3)=115
.5;
h19(3)=534.1;h20(3)=561.7;
h1(4)=3356.3;h2(4)=2977.5;h3(4)=3490.4;h4(4)=3282.6;h5(4)=3019.2;
h6(4)=2812.6;h7(4)=2649.6;h8(4)=2471.4;h9(4)=2425.4;h10(4)=100.3;h11(4)=105
.5;
h19(4)=504.7;h20(4)=549.0;

for i=1:4
%calculer WT : le travail de la turbine
WHP(i)= (h1(i)-h2(i))*(1-(Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i)+DH)/Qm(i));
WMP(i)= (h3(i)-h4(i))*(1-((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))+(Agh(i)+Bgh(i)+Cgh(i))...
+ s6(i))/Qm(i)) + (h4(i)-h5(i))*(1-((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))+
(Agh(i)+Bgh(i))...
+Cgh(i))+s6(i)+s5(i))/Qm(i));
WBP(i)= (h5(i)-h6(i))*(1-((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))+(Agh(i)+Bgh(i)+Cgh(i))+
s6(i)+s5(i)+s4(i))...
+(Bdm(i)+Cdm(i))+(Bgm(i)+Cgm(i))-Admr(i))/Qm(i))+(h6(i)-h7(i))*(1-
((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))...
+(Agh(i)+Bgh(i)+Cgh(i))+s6(i)+s5(i)+s4(i)+s3(i)+(Bdm(i)+Cdm(i))+(Bgm(i)+Cgm
(i))...
-Admr(i))/Qm(i))+(h7(i)-h8(i))*(1-
((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))+(Agh(i)+Bgh(i)+Cgh(i))+s6(i)+...
s5(i)+s4(i)+s3(i)+s2(i)+(Bdm(i)+Cdm(i))+(Bgm(i)+Cgm(i))-
Admr(i))/Qm(i))+(h8(i)-h9(i))...
*(1-
((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))+(Agh(i)+Bgh(i)+Cgh(i))+s6(i)+s5(i)+s4(i)+s3(i)+s2(i)
)+s1(i)+...
(Bdm(i)+Cdm(i))+(Bgm(i)+Cgm(i))-Admr(i))/Qm(i));
WT(i)=WHP(i)+WMP(i)+WBP(i);
%calculer Wpex :le travail des pompes d'extraction
Wpex(i)= (h11(i)-h10(i))*(1+(Qr(i)-s6(i)-s5(i)-s4(i))/Qm(i));
%calculer Wpa : le travail des pompes alimentaires
Wpa(i)= (h20(i)-h19(i));
%calculer la quantité de chaleur introduite dans la chaudière
Qch(i)= (hs(i)-h22(i))+(h3(i)-h2(i))*(1-
((Adh(i)+Bdh(i)+Cdh(i))+(Agh(i)+Bgh(i)+Cgh(i))+s6(i))/Qm(i));
%calculer le rendement du cycle
Rc(i)=((WT(i)*Rmt)-(Wpex(i)/Rpe)+(Wpa(i)/Rpa))/(Qch(i)/Rch);
%calculer la puissance utile
Pu(i)=WT(i)*Rmt*Qm(i);

```

## Annexes

```
Pint(i)=Qch(i)*Qm(i)/Rch;
```

```
end
```

```
% rendement global de la centrale
Rgc(1)=(3*Pu(1))/(3*Pint(1));
Rgc(2)=(3*Pu(2))/(3*Pint(2));
Rgc(3)=(3*Pu(3))/(3*Pint(3));
Rgc(4)=(3*Pu(4))/(3*Pint(4));
%rendement de la turbine a gaz
PuGT=249400;PintGT=649479;% en kW
Qhrsg=109;%kg/s
RGT=PuGT/PintGT;
%groupe 1 2 et 3 100% turbine a gaz et a vapeur a chaque charge
Rg100=(PuGT+3*Pu(1))/(PintGT+3*Pint(1));
% groupe 1 2 et 3 75%
Rg75=(PuGT+3*Pu(2))/(PintGT+3*Pint(2));
% groupe 1 2 et 3 50%
Rg50=(PuGT+3*Pu(3))/(PintGT+3*Pint(3));
% groupe 1 2 et 3 25%
Rg25=(PuGT+3*Pu(4))/(PintGT+3*Pint(4));
% rendement d'un seul groupe transformé
Qm1=Qm(1)-Qhrsg;Pint1=Qch(4)*Qm1/Rch;
RCC(1)=(PuGT+Pu(1))/(PintGT+Pint1);
Qm2=Qm(1)-(Qhrsg/2);Pint2=Qch(3)*Qm2/Rch;
RCC(2)=(PuGT+Pu(1))/(PintGT+Pint2);
Qm3=Qm(1)-(Qhrsg/3);Pint3=Qch(2)*Qm3/Rch;
RCC(3)=(PuGT+Pu(1))/(PintGT+Pint3);
%rendement global de la centrale avec HRSG
% groupe 1 25% 2 et 3 et 100%
Qm1=Qm(1)-Qhrsg;Pint1=Qch(4)*Qm1/Rch;
Rg(1)=(PuGT+3*Pu(1))/(PintGT+Pint1+2*Pint(1));

% groupe 1 et 2 50% et 3 et 100%
Qm2=Qm(1)-(Qhrsg/2);Pint2=Qch(3)*Qm2/Rch;
Rg(2)=(PuGT+Pu(1)+Pu(1)+Pu(1))/(PintGT+2*Pint2+Pint(1));

% groupe 1 2 et 3 25%
Qm3=Qm(1)-(Qhrsg/3);Pint3=Qch(2)*Qm3/Rch;
Rg(3)=(PuGT+Pu(1)+Pu(1)+Pu(1))/(PintGT+3*Pint3);

%rendement global de la nouvelle centrale avec diminution de charge
Rcharge(1)=(PuGT+3*Pu(1))/(PintGT+3*Pint(2));
Rcharge(2)=(PuGT+Pu(2)+Pu(1)+Pu(3))/(PintGT+3*Pint(3));
Rcharge(3)=(PuGT+3*Pu(3))/(PintGT+3*Pint(4));

%rendement global a cahque charge , avec Pint=0 pour un groupe
Ncharge(1)=(PuGT+3*Pu(2))/(PintGT+2*Pint(2));
Ncharge(2)=(PuGT+2*Pu(2)+Pu(3))/(PintGT+3*Pint(3));

figure(1)
ch=[100 75 50 25];
plot1=plot(ch,Rc,'b*-')
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)
grid on
xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement du cycle','fontsize',15)
```

```
figure(2)
ch=[100 75 50 25];
plot1=plot(ch,Rgc,'b*-')
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)
grid on
xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement global de la centrale','fontsize',15)
```

```
figure(3)
ch=[100 75 50 25];
rg=[Rg100 Rg75 Rg50 Rg25];
plot1=plot(ch,rg,'b*-')
grid on
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)

xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement global de TV+TG à chaque charge','fontsize',15)
set(legend,'fontsize',13)
```

```
figure(4)

ch2=[ 25 50 75];

rg=[RCC(1) RCC(2) RCC(3)];
plot1=plot(ch2,RCC,'b*-')
grid on
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)

xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement de la nvl inst pour un grp','fontsize',15)
set(legend,'fontsize',15)
```

```
figure(5)

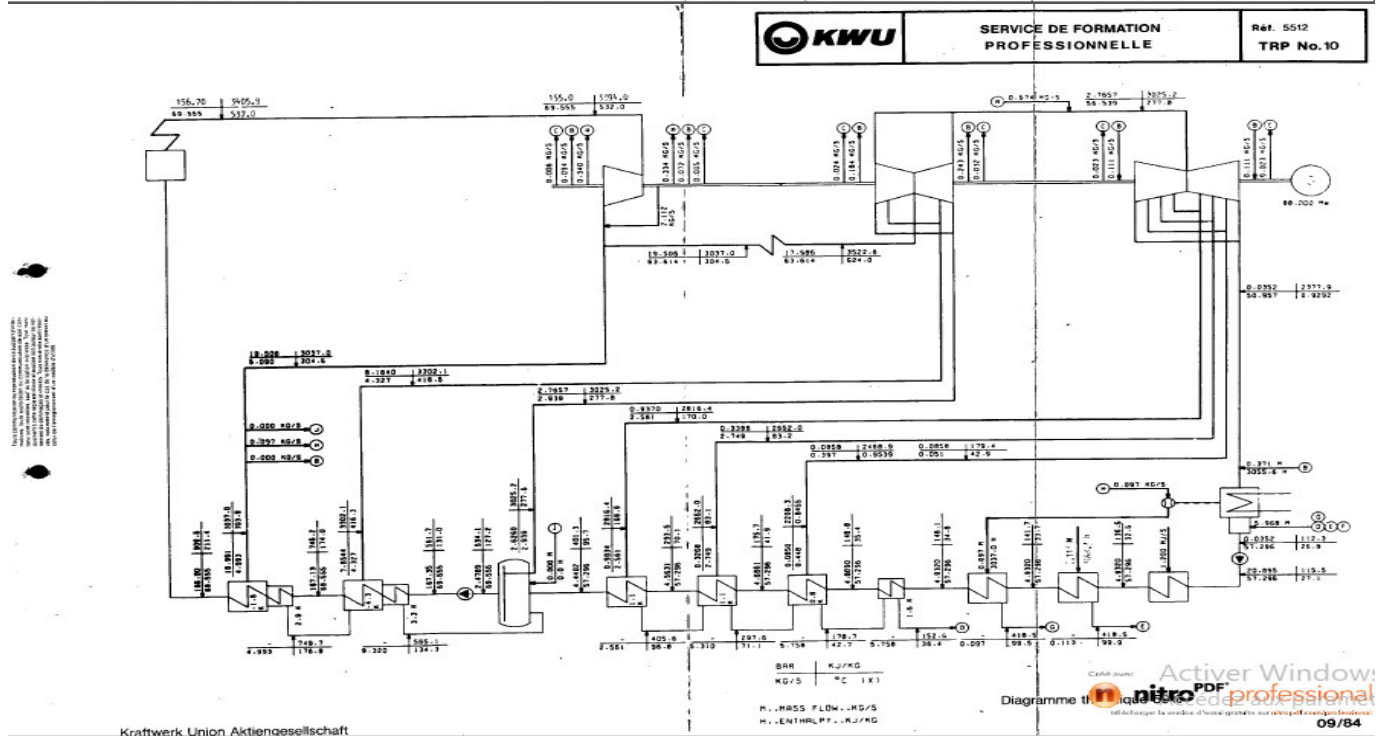
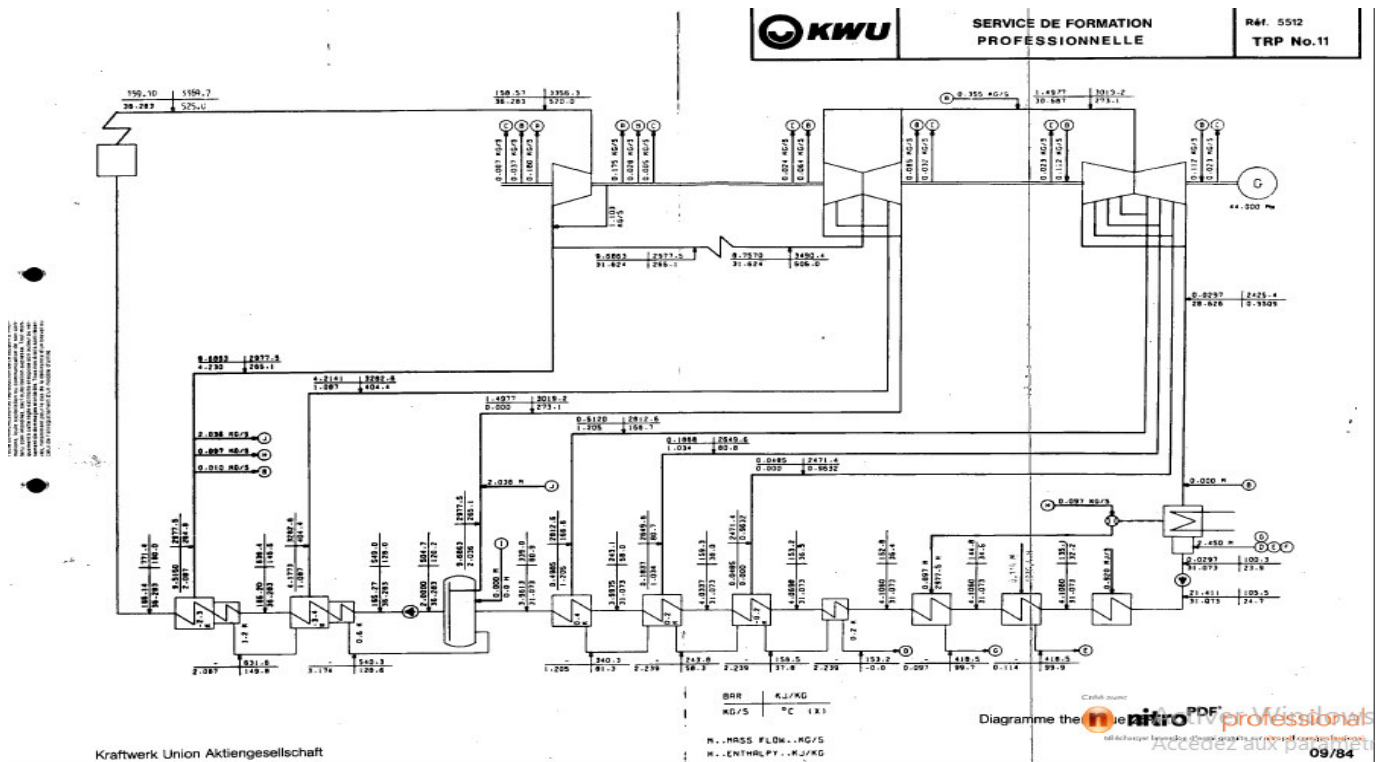
ch=[25 50 75];
plot1=plot(ch,Rg,'b*-')
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)
grid on
xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement global de la nouvelle centrale','fontsize',13)
```

```
figure(6)
ch=[75 50 25];
plot1=plot(ch,Rcharge,'b*-')
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)
grid on
xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement global de la nvl inst avec diminution de charge',
'','fontsize',12)
figure(7)
ch=[75 50];
plot1=plot(ch,Ncharge,'b*-')
set(plot1,'linewidth',2,'MarkerSize',15)
grid on
xlabel('Charges %','fontsize',15)
ylabel('Rendement global de la nouvelle centrale avec Pint=0 pour un groupe',
'','fontsize',10)
```





# Annexes



## **Références bibliographiques**

### Références bibliographiques :

- [1] Documentation interne de l'entreprise KWU service de formation professionnelle, « circuit d'eau et de vapeur »
- [2] MICHEL GROUT et PATRICK SALAUM, « instrumentation industriel et installation des capteurs et des vannes »
- [3] : Documentation de la centrale de cap djinet : générateur, de vapeur, Allemagne, 2009.
- [4] : Documentation de la centrale de cap djinet : turbine à vapeur, réalisé par Mr : SAADA Ghersallah, 1998.
- [5] <http://www.mechanicaltutorial.com/working-principle-of-steam-turbine-classification-or-types-of-steam-turbine>
- [6] <http://www.mechscience.com/steam-turbine-introduction-and-principle-operations/encyclopedia-of-engineering>
- [7] <https://www.360training.com/blog/steam-turbines-application/>
- [8] [http:// www.irjes.com](http://www.irjes.com) International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES) ISSN (Online) 2319-183X, (Print) 2319-1821 Volume 3, Issue 2 (February 2014), PP.32-48 Chernobay Y., Chala K. National University of Food Technologies (Kiev, Ukraine)
- [9] <https://technology-articles.com/what-is-rankine-cycle/>
- [10] <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cycles-orc.html>
- [11] [http://www.wikiwand.com/fr/Cycle\\_de\\_Rankine#/Cycle\\_de\\_Hirn](http://www.wikiwand.com/fr/Cycle_de_Rankine#/Cycle_de_Hirn)
- [12] Mémoire de magister : Meziane Lila, Analyse des performances d'unités de production d'énergie : cas d'une turbine à gaz soutenu le 30 Octobre 2011
- [13] [https://www.researchgate.net/profile/Lotfi\\_Snoussi/publication/282152071\\_amelioration\\_du\\_rendement\\_de\\_la\\_turbine\\_a\\_gaz\\_par\\_refroidissement\\_de\\_l'air/links/59bd034da6fdcca8e567aac6/amelioration-du-rendement-de-la-turbine-a-gaz-par-refroidissement-de-lair](https://www.researchgate.net/profile/Lotfi_Snoussi/publication/282152071_amelioration_du_rendement_de_la_turbine_a_gaz_par_refroidissement_de_l'air/links/59bd034da6fdcca8e567aac6/amelioration-du-rendement-de-la-turbine-a-gaz-par-refroidissement-de-lair)
- [14] <http://www.thermodynamicsheatengines.com/HeatEnginesVol%203%20Chapter%204%20ORS>
- [15] <https://www.mechgrid.com/gas-turbine-and-classification-of-gas-turbine.html>

## Références bibliographiques

---

- [16] [https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/gas\\_turbine-research.pdf](https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/gas_turbine-research.pdf)
- [17] <https://files.asme.org/igti/knowledge/articles/13051.pdf>
- [18] <https://www.metka.com/fr/secteurs-d-activite/energie/energie-centrales-electriques/centrales-%C3%A0-cycle-combin%C3%A9>
- [19] <https://www.fournisseurs-electricite.com/infos-pratiques-sur-les-fournisseurs-delectricite/les-centrales-electriques/cycle-combine>
- [20] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.800.1755&rep=rep1&type=pdf>
- [22] <http://www.midcogen.com/combined-cycle-tech.php>
- [23] professeur G.Heyen : simulation et aide au dimensionnement des chaudières de récupération, laboratoire d'analyse et de synthèse des systèmes chimiques
- [24] <https://www.ge.com/power/resources/knowledge-base/combined-cycle-power-plant-how-it-works>
- [25] <https://thermogenpower.com/advantages-and-disadvantages-of-gas-and-steam-turbines-power-plants/by> Nestro Ortoga April/4 2018
- [26] <http://blog.bio-ressources.com/2017/01/17/cycles-combines-gaz-choix-de-loptimisation/>
- [27] : documentation de la centrale : 1131.1 MW Combined cycle power point at Ras Djinet at the site conditions.
- [28] : Catalogue Siemens SGT5 4000F.
- [29] : documentation de la centrale de Ras-Djinet /cycle combiné Unité Siemens SCC5-4000F /HRSG
- [30] : documentation de la centrale de Ras Djinet: étude technico-économique de la transformation de la centrale de cap djinet en cycle combiné2005.
- [31] : <https://comptabilite.ooreka.fr/astuce/voir/455565/cash-flow>
- [32] : <https://www.journaldunet.fr/business/dictionnaire-economique-et-financier/1198843-valeur-residuelle-definition-calcul-traduction/Feb,2019>.
- [33] : mémoire de Magister présenté par **Mohamed MESKINE** : Etude technico-économique de la mini tri génération pour le tertiaire, soutenu le 24/06/2009.