

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : GENIE MECANIQUE
Spécialité : ENERGETIQUE

Thème

Performance du cycle eau-vapeur des chaudières industrielles

Présenté Par :

- 1) MAHRAZ MOHAMED
- 2) ABBAS OUSSAMA

Devant les jurys composés de :

Mr OUDAD WAHID	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr BELHAMIANI MOHAMED	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr GUENDOUZE BOUHELAL	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2017/2018

❧ Remerciement ❧

Nombreux sont ceux qui méritent d'être remercié pour l'accomplissement de ce modeste travail. Avant tout, nous tenons à remercier "ALLAH" le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté Afin d'être dans le droit chemin.

Nous saisissons cette occasion pour présenter nos sincères remerciements à Monsieur BELHAMIANI MOHAMED, notre encadreur, de nous avoir fait confiance pour mener ce travail, pour l'orientation, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité

Qu'il nous soit permet d'exprimer notre profonde gratitude à Mr OUDAD.W qui a accepté de présider le jury. Il nous est agréable de lui exprimer nos sincères reconnaissances. Nous sommes également reconnaissants à Mr GUENDOUIZ.E.B qui a bien voulu nous faire l'honneur d'examiner notre mémoire. Qu'il trouve ici toutes nos estimes et notre respectueuse gratitude.

Nous remercions en particulier nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience et bien sur nos amis.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci 

❧ Remerciement ❧

Nombreux sont ceux qui méritent d'être remercié pour l'accomplissement de ce modeste travail. Avant tout, nous tenons à remercier "ALLAH" le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté Afin d'être dans le droit chemin.

Nous saisissons cette occasion pour présenter nos sincères remerciements à Monsieur BELHAMIANI MOHAMED, notre encadreur, de nous avoir fait confiance pour mener ce travail, pour l'orientation, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité

Qu'il nous soit permet d'exprimer notre profonde gratitude à Mr OUDAD.W qui a accepté de présider le jury. Il nous est agréable de lui exprimer nos sincères reconnaissances. Nous sommes également reconnaissants à Mr GUENDOUCHE.B qui a bien voulu nous faire l'honneur d'examiner notre mémoire. Qu'il trouve ici toutes nos estimes et notre respectueuse gratitude.

Nous remercions en particulier nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience et bien sur nos amis.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci 



Dédicace

Je dédie le présent mémoire de fin d'étude à toute ma famille.

A Mon très Cher père qui a consacré toute son énergie et sa patience, de m'avoir éduqué, pour tous les soins que porte un père à sa propre progéniture ; pour me mettre sur les rails de la vie en me rendant homme adulte, responsable, capable de voler de mes propres ailes.

A Ma très Chère mère, pour qui aucuns mots ne pourra décrire toute ma reconnaissance indéfectible et un amour sans fin sans faille pour les peines et les douleurs qu'elle a endurées et encaissées pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui. Puisse dieu et par sa grâce Infinie me donner toute l'énergie et la force pour accomplir des tâches nobles dans cette vie terrestre pour leur rendre un tant soit peu cette dette que nul ne pourra combler et assurer.

Grand merci Papa, grand merci Mama.

A mes frères ZOHIER, ALI, AYOUB, et DIYAE

A tous mes amis et à toute ma famille.

Egalement à Mr. BELHAMIANI MOHAMED pour son encadrement et pour l'aide qu'il nous a prodigé durant cette mémoire, ainsi qu'à tous mes enseignants

*« Pour Tous Ceux On
Demande De Allah Qu'il Les
Récompense »*

MAHRAZ MOHAMED





Dédicace

A Mes Très Chers Parents Le Symbole De Tendresse, L'exemple Du Dévouement

Qui N'a Pas Cessé De M'encourager Et De Prier

Pour Moi .Qui S'ont Sacrifiée Pour Mon Bonheur Et Ma Réussite

Abdelkader et Karima

A Mes Frères : Mohamed et Islem

A Mes Très Cher Sœurs : Sarra, Halla

A Tous Ceux Qui Me Sont Chers : Grande Famille et Abbas Mes Amis

Egalement A Mr. BELHAMIANI Mohamed Pour Son Encadrement Et Pour

L'aide Qu'il Nous A Prodigué Durant Cette Mémoire,

Ainsi Qu'à Tous Mes Enseignants

« Pour Tous Ceux On Demande De Allah Qu'il Les Récompense »

ABBAS OUSSAMA



TABLE DES MATIERES

Remercîment et dédicaces

Résumé

Liste des figures

Introduction générale

Chapitre I : Description Des Chaudière

I.	Introduction	2
II.	Historique	3
III.	Classification des chaudières	3
III.1.	Les chaudières conventionnelles :	4
III.2.	Les chaudières de récupération :	4
IV.	Eléments constituant une chaudière	4
IV.1.	Chambre de combustion	4
IV.2.	Brûleurs	4
IV.3.	Economiseur	5
IV.4.	Réservoir (Ballon supérieur)	5
IV.5.	Surchauffeurs	5
IV.6.	Réchauffeur d'air :	6
V.	Les différents types des chaudières	6
V.1.	Chaudière à tube fumée	6
V.1.a.	Présentation	6
V.1.b.	Fonctionnement	7
V.1.c.	Précautions	7
V.1.d.	Production de vapeur surchauffe	7
V.2.	Chaudière à tube d'eau	8
V.2.a.	Présentation	8
V.2.b.	Fonctionnement	8
V.2.c.	Précautions	11
V.2.d.	Production de vapeur surchauffée	12
VI.	Alimentation des chaudières	12
VII.	Contrôle et limitation de pression	13
VII.1.	Le manomètre	13

VII.2 La soupapes de sûreté	14
VIII. Autres dispositifs de sécurité sur les chaudières	16
VIII.1. Vanne d'arrêt de vapeur	16
VIII.2. Vanne de vidange	16
VIII.3. Clapet de retenue de vapeur	16
VIII.4. Fermeture automatique des foyers et des cendriers.....	16
IX. Importance et modalités de l'entretien.....	17
X. Nettoyage des surfaces cote gaz	17

Chapitre II : Cycles Thermodynamiques Des Chaudières A Vapeur

I. Introduction.....	18
II. La vapeur.....	18
II.1. Définition	18
II.2. Utilisation industrielle	18
II.3. Thermodynamique classique de la vapeur	19
II.4. Relation entre les phases liquide et vapeur	19
III. Diagramme entropique	21
IV. Cycle de Rankine/Hirn.....	22
V. Généralités sur la combustion.....	28
V.1. Définition	28
V.2. Caractéristique est composition chimique du fuel.....	28
VI. Le transfert de chaleur dans les chaudières à vapeur	30
VI.1. Rayonnement dans une chaudière à vapeur	30
VI.2. Convection dans une chaudière à vapeur	30
VI.3. Conduction dans les chaudières à vapeur.....	30
VII. Les méthodes de calcul du rendement.....	31
VII.1 Première méthode.....	32
VII.1.1. Les puissances introduites dans la chaudière.....	33
VII.2. Deuxième méthode	34
VII.2.1. Pertes par fumées.....	35
VII.2.2. Pertes par parois.....	36
VII.2.3. Rendement global.....	36

Chapitre III : Etude De Cas D'un Cycle Eau-Vapeur

I. Introduction	38
II. Présentation du logiciel Thermoptim.....	38
III. Applications de L'outil Thermoptim	39
III.1. Application pédagogique.....	39
III.2 Applications industrielles	40
IV. Description de l'outil numérique.....	41
V. Description du cycle de la chaudière à vapeur étudié.....	42
V.1. Création du modèle	43
V.1.a. Composantes du cycle.....	43
V.2. Création des éléments du simulateur.....	43
V.3. Paramètres de fonctionnement du cycle étudié	45
V.3.a. Pour la source chaude gaz échappement.....	45
V.3.b Pour le cycle eau vapeur	46
V.2. Amélioration du cycle avec resurchauffe	48
VI. Résultats et interprétations.....	53
VI.2. Amélioration du cycle avec resurchauffe.....	56
VI.3. Amélioration du cycle avec resurchauffe et prélèvement.....	57

Conclusion générale

Références bibliographique

Liste des figures

FIGURE I-1: chaudière industrielle.....	2
FIGURE I-2: Un brûleur.....	4
FIGURE I-3: Le ballon supérieur.....	5
FIGURE I-4: une chaudière à tube de fumée.....	6
FIGURE I-5: principe de fonctionnement d'une chaudière à tube de fumée.	7
FIGURE I-6: Une chaudière à tube d'eau.....	8
FIGURE I-7: Circuit Eau/Vapeur.....	10
FIGURE I-8: Circuit Air/Fumée.	11
FIGURE I-9: le manomètre.....	14
FIGURE II-1: Relation entre pression, volume et température.....	19
FIGURE II-2: Relation entre la pression et le volume	20
FIGURE II-3: Diagramme pression.....	21
FIGURE II-4: Diagramme entropique (T , S) de l'eau.	22
FIGURE II-5: Cycle idéal de Rankine dans le diagramme T-s de l'eau.....	22
FIGURE II-6: Cycle idéal de Hirn dans le diagramme T-s de l'eau	24
Figure II-7: Ecart entre le cycle à vapeur réel et le cycle de Rankine idéal.....	26
Figure II-8: Distribution de la température avec flux constant.....	31
Figure II-9: Bilan d'énergie du système chaudière.....	32
Figure II-10: Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement.....	35
Figure III-1: Synoptique d'un Turbine à gaz bi étagée.....	39
Figure III-2a: schéma d'une centrale à vapeur.....	42
Figure III-2b: cycle de Hirn.....	42
Figure III-3: schéma du cycle vapeur étudié sur thermoptim.....	43
Figure III-4: interface shéma-simulateur.....	44
Figure III-5: synoptique du simulateur.....	44

Liste des figures

Figure III-6a: <i>Constituants principaux du gaz de combustion</i>	45
Figure III-6b : <i>paramétrage de la source chaude sur Thermooptim</i>	45
Figure III-7: <i>paramétrage de l'élément économiseur</i>	46
Figure III-8: <i>paramétrage de l'élément évaporateur</i>	46
Figure III-9: <i>paramétrage de l'élément surchauffeur</i>	47
Figure III-10: <i>Détente dans la turbine à vapeur</i>	47
Figure III-11: <i>condensation de la vapeur après détente</i>	48
Figure III-12: <i>recirculation de l'eau condensée par pompe</i>	48
Figure III-13: <i>cycle avec resurchauffe de la vapeur</i>	49
Figure III-14: <i>Schéma du cycle avec resurchauffe de la vapeur</i>	49
Figure III-15 : <i>paramétrage du cycle avec resurchauffe de la vapeur sur simulateur</i>	50
Figure III-16 : <i>cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur</i>	51
Figure III-17 : <i>Schéma du cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur</i>	51
Figure III-18 : <i>paramétrage du cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur sur simulateur</i>	52
Figure III-19: <i>Evolution de l'efficacité du cycle avec le taux de compression de l'eau à l'entrée de l'économiseur</i>	53
Figure III-20: <i>Diagramme entropique du cycle étudié à différentes pressions d'entrée d'eau</i>	54
Figure III-21: <i>Diagramme enthalpique du cycle étudié à différentes pressions de sortie d'eau</i>	54
Figure III-22: <i>Diagramme entropique du cycle étudié à différentes pressions de sortie d'eau</i>	55
Figure III-23 : <i>diagramme enthalpique du cycle simple</i>	56
Figure III-24 : <i>diagramme enthalpique du cycle avec resurchauffe</i>	56
Figure III-25 : <i>diagramme entropique du cycle avec resurchauffe</i>	57
Figure III-26 : <i>diagramme enthalpique du cycle avec resurchauffe et prélèvement</i>	57
Figure III -27 : <i>Diagramme entropique du cycle avec resurchauffe et prélèvement</i>	58

Liste des figures

FIGURE I-1: chaudière industrielle.....	2
FIGURE I-2: Un brûleur.....	4
FIGURE I-3: Le ballon supérieur.....	5
FIGURE I-4: une chaudière à tube de fumée.....	6
FIGURE I-5: principe de fonctionnement d'une chaudière à tube de fumée.	7
FIGURE I-6: Une chaudière à tube d'eau.....	8
FIGURE I-7: Circuit Eau/Vapeur.....	10
FIGURE I-8: Circuit Air/Fumée.	11
FIGURE I-9: le manomètre.....	14
FIGURE II-1: Relation entre pression, volume et température.....	19
FIGURE II-2: Relation entre la pression et le volume	20
FIGURE II-3: Diagramme pression.....	21
FIGURE II-4: Diagramme entropique (T , S) de l'eau.	22
FIGURE II-5: Cycle idéal de Rankine dans le diagramme T-s de l'eau.....	22
FIGURE II-6: Cycle idéal de Hirn dans le diagramme T-s de l'eau	24
Figure II-7: Ecart entre le cycle à vapeur réel et le cycle de Rankine idéal.....	26
Figure II-8: Distribution de la température avec flux constant.....	31
Figure II-9: Bilan d'énergie du système chaudière.....	32
Figure II-10: Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement.....	35
Figure III-1: Synoptique d'un Turbine à gaz bi étagée.....	39
Figure III-2a: schéma d'une centrale à vapeur.....	42
Figure III-2b: cycle de Hirn.....	42
Figure III-3: schéma du cycle vapeur étudié sur thermoptim.....	43
Figure III-4: interface shéma-simulateur.....	44
Figure III-5: synoptique du simulateur.....	44

Liste des figures

Figure III-6a: <i>Constituants principaux du gaz de combustion</i>	45
Figure III-6b : <i>paramétrage de la source chaude sur Thermooptim</i>	45
Figure III-7: <i>paramétrage de l'élément économiseur</i>	46
Figure III-8: <i>paramétrage de l'élément évaporateur</i>	46
Figure III-9: <i>paramétrage de l'élément surchauffeur</i>	47
Figure III-10: <i>Détente dans la turbine à vapeur</i>	47
Figure III-11: <i>condensation de la vapeur après détente</i>	48
Figure III-12: <i>recirculation de l'eau condensée par pompe</i>	48
Figure III-13: <i>cycle avec resurchauffe de la vapeur</i>	49
Figure III-14: <i>Schéma du cycle avec resurchauffe de la vapeur</i>	49
Figure III-15 : <i>paramétrage du cycle avec resurchauffe de la vapeur sur simulateur</i>	50
Figure III-16 : <i>cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur</i>	51
Figure III-17 : <i>Schéma du cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur</i>	51
Figure III-18 : <i>paramétrage du cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur sur simulateur</i>	52
Figure III-19: <i>Evolution de l'efficacité du cycle avec le taux de compression de l'eau à l'entrée de l'économiseur</i>	53
Figure III-20: <i>Diagramme entropique du cycle étudié à différentes pressions d'entrée d'eau</i>	54
Figure III-21: <i>Diagramme enthalpique du cycle étudié à différentes pressions de sortie d'eau</i>	54
Figure III-22: <i>Diagramme entropique du cycle étudié à différentes pressions de sortie d'eau</i>	55
Figure III-23 : <i>diagramme enthalpique du cycle simple</i>	56
Figure III-24 : <i>diagramme enthalpique du cycle avec resurchauffe</i>	56
Figure III-25 : <i>diagramme entropique du cycle avec resurchauffe</i>	57
Figure III-26 : <i>diagramme enthalpique du cycle avec resurchauffe et prélèvement</i>	57
Figure III -27 : <i>Diagramme entropique du cycle avec resurchauffe et prélèvement</i>	58

Résumé

La vapeur est utilisée comme source d'énergie thermique dans des domaines variés, elle est convertie en énergie électrique dans les centrales nucléaires et les centrales thermiques à turbine à vapeur, son usage est très présent aussi dans la chimie, le papier et l'agroalimentaire pour le chauffage industriel.

Dans ce travail on s'est intéressé à l'étude de la performance du bénéfice énergétique des soutirages de vapeur produits à travers les chaudières industrielles. Nous avons utilisé un progiciel pour faciliter les calculs de ce bénéfice.

Mots clés : vapeur, thermodynamique, rendement, cycle Rankine, cycle Hirn, bilan thermique, chaudière, turbine à vapeur, bilan énergétique.

Summary

Steam is used as a source of thermal energy in various fields, it is converted into electrical energy in nuclear power plants and steam turbine power plants, its use is also very present in the chemical, paper and food industries. for industrial heating.

In this work we are interested in the study of the performance of the energy benefit of steam withdrawals produced through industrial boilers. We used a firmware to facilitate the calculations of this benefit.

Key words: steam, thermodynamics, efficiency, Rankine cycle, Hirn cycle, heat balance, boiler, steam turbine, energy balance.

ملخص:

يستخدم البخار كمصدر للطاقة الحرارية في مختلف المجالات، ويتم تحويله إلى طاقة كهربائية في محطات الطاقة النووية ومحطات توليد الطاقة التوربينية البخارية، كما أن استخدامه موجود جداً في الصناعات الكيماوية والورقية والغذائية. للتدفئة الصناعية.

في هذا العمل، نحن مهتمون بدراسة أداء منفعة الطاقة لعمليات سحب البخار الناتجة عن الغلايات الصناعية. استخدمنا البرامج الثابتة لتسهيل حسابات هذه الميزة

الكلمات المفتاحية: البخار، الديناميكا الحرارية، الكفاءة، دورة رانكين، دورة هيرن، توازن الحرارة، المرجل، التوربين البخاري، توازن الطاقة

Introduction Générale

L'industrie utilise couramment la vapeur comme énergie nécessaire à la réalisation de nombreux et variés procédés. La vapeur est un fluide caloporteur disponible en grande quantité, facilement transportable et non toxique. La production de vapeur demande l'utilisation d'un combustible et l'utilisation d'un générateur de vapeur (chaudière). De plus la production de vapeur couplée à une turbine électrique permet 75% de la production mondiale d'électricité.

La chaudière est un appareil (voir une installation industrielle, selon sa puissance) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion ou gaz de procédés chimiques, chaudière « nucléaire » recevant la chaleur du circuit primaire, etc.), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). Les chaudières sont aussi bien des systèmes industriels que domestiques.

À l'intérieur de la chaudière, ce fluide caloporteur peut être soit uniquement chauffé (c'est-à-dire qu'il reste en phase liquide), soit chauffé et vaporisé, soit chauffé, vaporisé puis surchauffé (donc avec passage de la phase liquide à la phase gazeuse).

L'objectif de ce travail est de condenser les notions nécessaires pour la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur dans les chaudières et de présenter les calculs thermiques fondamentaux.

Ce travail fera un rappel sur les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement des chaudières à vapeur.

Dans le cadre de notre sujet de mémoire de master nous avons répartie notre travail en trois parties :

- La première partie est une mise en œuvre du travail qui consiste à étudier les chaudières répondues en industrie.
- La deuxième partie est consacrée aux divers calculs sur les cycles thermodynamiques appliqué au cycle a vapeur
- La dernière partie consiste à simuler un cycle de production de vapeur à l'aide du logiciel thermoptim

I. Introduction

La chaudière est un générateur de chaleur produisant généralement de l'eau chaude pour le chauffage. Ce n'est pas la seule utilisation d'une chaudière qui peut produire de la vapeur, le plus souvent pour des applications industrielles. Une chaudière comporte un corps de chauffe avec un circuit d'eau intégré qui récupère la chaleur produite par un brûleur utilisant un combustible gaz, fioul, bois ... Elle présente de par son combustible, un rendement de combustion. Selon son dimensionnement et les différents appels de puissance, elle génèrera un rendement de production. C'est dire qu'une chaudière qu'elle soit une chaudière gaz, ou une chaudière au fioul ou une chaudière bois pourra présenter différents rendements selon les applications qu'elle sert. D'où la notion d'économies d'énergie et d'efficacité énergétique de ladite chaudière.

L'efficacité des chaudières est désormais réelle. Nous trouvons les meilleurs rendements avec les chaudières à condensation. La chaleur latente des fumées est ainsi récupérée sur le retour d'eau chaude de chauffage. Les fumées sortent plus froides et la chaleur est transférée au circuit de chauffage.

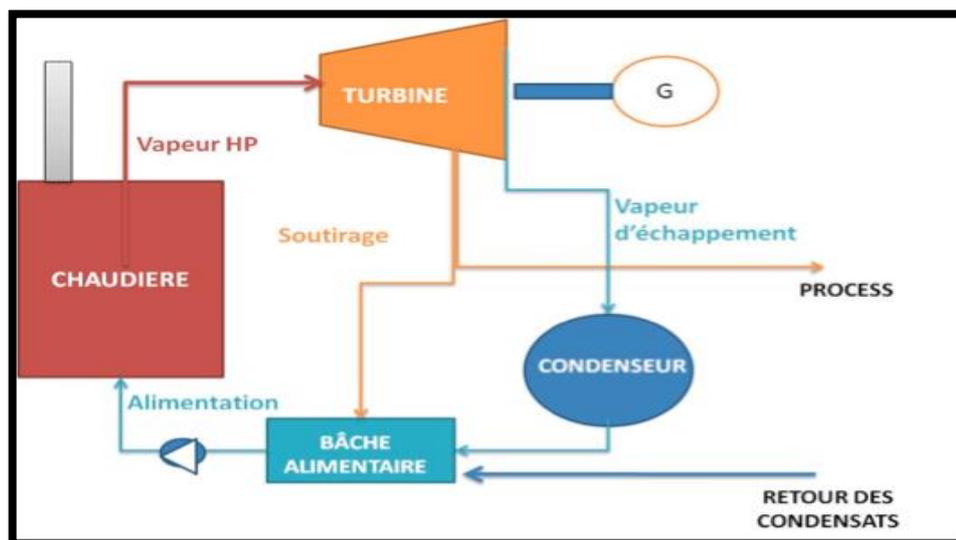


Figure I-1: chaudière industrielle

II. Historique

Une chaudière est une enceinte fermée qui sert à transformer l'eau traitée en vapeur sous l'action de la chaleur fournie par la combustion.

La production de la vapeur est obtenue par l'échange de l'énergie calorifique fournie par la combustion et l'eau.

L'idée d'utiliser **la vapeur comme force motrice** remonte au 1er siècle avec l'invention de l'éolipile par Héron d'Alexandrie. Mais ce n'est véritablement qu'à partir de fin du 17ème siècle que les ingénieurs ont développé les machines à vapeur modernes. En 1800, l'ingénieur américain Evans mis au point la première chaudière à tubes de fumée qui servit dans les premières locomotives. La nécessité d'avoir des débits et pressions de vapeur importants aboutit en 1867 à la mise au point de la chaudière à tubes d'eau par les ingénieurs américains BABCOK et WILCOX. Depuis, celles-ci se sont sans cesse perfectionner permettant d'avoir notamment des rendements de 90,0 %.

Années 1955-1970 : apparition des foyers au fuel avec les premières chaudières à éléments en fonte, et l'apparition de nouvelles chaudières plus performantes après crise du pétrole de 1973. Après 1973 : chaudières chauffage central avec rendements plus élevés et réductions des pertes par les gaz brûlés par rayonnement ainsi qu'à l'arrêt du brûleur.

Années 1980 : Amélioration des rendements avec les lois d'eau soit des chaudières dont la température d'eau varie progressivement en fonction de la température extérieure. Apparition des chaudières basse température (chaudière dont la température d'eau chaude ne dépasse pas 75°C et qui peut descendre à 40°C)

Années 1990 : montée en puissance de la chaudière à condensation qui récupère la chaleur latente des fumées. Les rendements dépassent les 100% sur PCI.

Années 2000 : mixage des énergies avec pompes à chaleur et solaire. Apparition de l'éco générateur, de la chaudière hybride (avec pompe à chaleur). [1]

III. Classification des chaudières

Les chaudières industrielles peuvent être classées en deux catégories principales :

III.1. Les chaudières conventionnelles :

Dans lesquelles la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par combustible liquide ou gaz. Les fumées circulent à l'intérieur d'un faisceau tubulaire dans les chaudières conventionnelles. On distingue les chaudières à tube d'eau et les chaudières à tube de fumées.

III.2. Les chaudières de récupération :

Utilisant la chaleur disponible dans les fluides de procédés à haut température ou dans les fumées des fours ou de turbines à gaz

En fonction de la nature des fluides et de leur condition de disponibilité, les chaudières de récupération peuvent être construites comme les chaudières conventionnelles, n'en utiliser que des éléments ou encore faire l'objet d'une technologie spéciale. [2]

IV. Eléments constituant une chaudière

IV.1. Chambre de combustion

C'est dans cette chambre que l'on brûle le mélange air combustible en libérant une certaine quantité de chaleur. Les murs latéraux et le plafond de cette chambre sont tapissés. L'échange thermique se fait par rayonnement, dans les tubes en acier appelés « tubes écrans ».

La sortie du gaz chaud (fumées) se fait généralement à travers une partie de la paroi latérale.

IV.2. Brûleurs

Les brûleurs sont des mécanismes, dans lesquels l'énergie chimiquement liée dans les carburants est libérée lorsqu'on les brûle. Ils sont intégrés essentiellement dans des chaudières pour le chauffage de l'eau et la génération de vapeur.

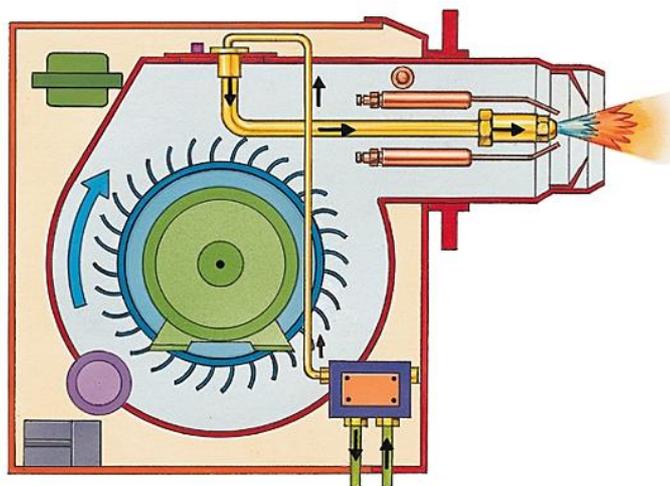


Figure I-2 : Un brûleur

Les brûleurs doivent engendrer la meilleure combustion possible c'est pour cela qu'il faut assurer un mélange homogène entre le carburant et le comburant au niveau du foyer.

IV.3. Economiseur

L'économiseur joue le rôle d'un échangeur de chaleur dont l'objectif est d'augmenter la température de l'eau d'alimentation qui provient du de gazeur à l'aide de la récupération d'une partie des calories restantes dans les gaz de combustion. L'économiseur est donc un échangeur de chaleur.

IV.4. Réservoir (Ballon supérieur)

La figure I-3 représente le ballon supérieur, qui joue le rôle d'un réservoir dans lequel est stockée l'eau d'alimentation. Il s'établit dans le réservoir un plan d'eau dont le niveau est maintenu à une valeur constante (50%). Au-dessus de ce plan, ce trouve la vapeur saturée ou humide qui se dégage vers l'échangeur de surchauffe.

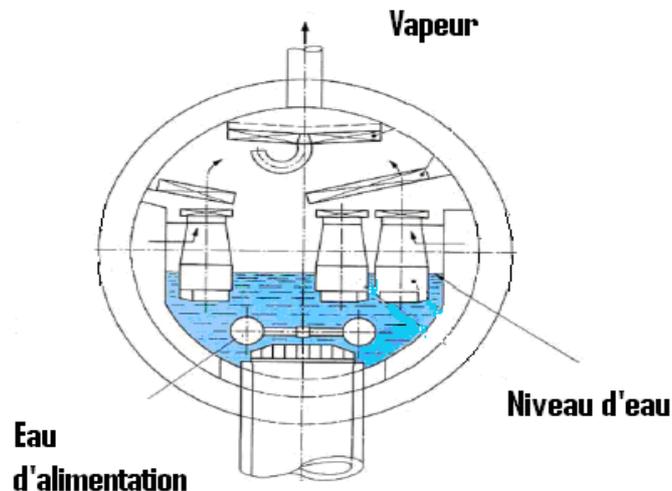


Figure I-3 : Le ballon supérieur

IV.5. Surchauffeurs

Les surchauffeurs reçoivent extérieurement les gaz venants directement de la chambre de combustion. Ce sont les faisceaux tubulaires du générateur de vapeur qui sont soumis aux températures les plus élevées. La vapeur saturée venant de la partie haute de réservoir, passe dans les tubes des surchauffeurs, où sa température est élevée à pression constante.

Bien que la vapeur surchauffée ne dépasse pas la température maximale autorisée par le matériel, un système de « désurchauffe » est parfois installé. Il s'agit d'un refroidissement de la vapeur.

IV.6. Réchauffeur d'air :

Le réchauffeur d'air absorbe la chaleur contenue dans les fumées. Il présente plusieurs avantages :

- Accélération des réactions de la combustion.
- Diminution de l'encrassement des surfaces de chauffe par une combustion plus complète.
- Amélioration du rendement, par réduction des pertes dans les fumées. [3]

V. Les différents types des chaudières

V.1. Chaudière à tube fumée

V.1.a. Présentation

Ce sont les chaudières les plus courantes dans l'industrie. Leur conception ne permet pas d'atteindre de haute pression, mais elles ont une grande réserve de vapeur et permettent d'absorber les demandes du réseau sans observer une trop grande baisse de pression.

L'appellation « tube de fumée » provient de la conception. En effet, le parcours des fumées Ce tube de chaudières fournit un débit de vapeur de 1 à 25 t/h, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fuel [2]



Figure I-4 : une chaudière à tube de fumée.

V.1.b. Fonctionnement

Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière.

Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la cuve, la vaporisation par apport de calories. [4]

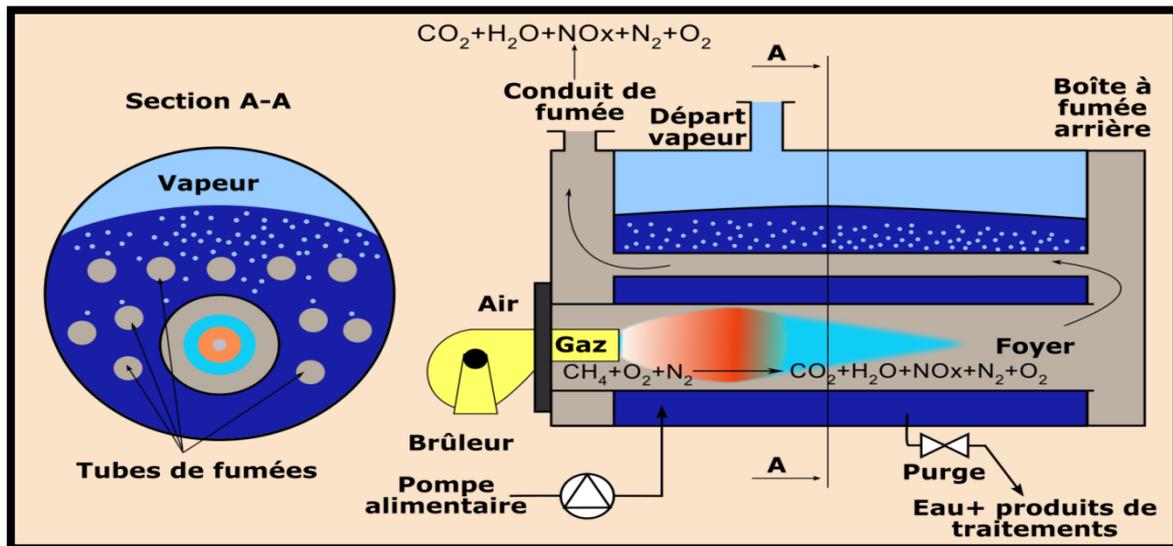


Figure I-5 : principe de fonctionnement d'une chaudière à tube de fumée

La figure (I-5) montre le parcours des fumées dans les tubes et on peut observer que la combustion prend place au centre du générateur de vapeur.

V.1.c. Précautions

Il est impératif de traiter l'eau de chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-température plus long, un risque surchauffe au niveau de tube foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de température des fumées au niveau de la cheminée. [5]

V.1.d. Production de vapeur surchauffe

Il est nécessaire de recourir à une surchauffeur (source de chaleur indépendante), en aval de la chaudière à tube de fumée. [5]

V.2. Chaudière à tube d'eau

V.2.a. Présentation

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 t/h, en moyenne et haut pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets. [5]



Figure I-6 : Une chaudière à tube d'eau.

V.2.b. Fonctionnement

Le fonctionnement d'une chaudière fait intervenir deux principaux circuits : un circuit Eau/vapeur dont le but est la transformation de l'eau en vapeur afin d'obtenir une vapeur à 400°C et 45bar ; et un circuit air/gaz qui sert à produire de la chaleur par la combustion. Ces deux circuits seront détaillés dans la figure (I-7)

V.2. b.1. Circuit Eau/Vapeur

- **L'arrivée de l'eau d'alimentation :**

L'eau d'alimentation est stockée dans une bache, provient en partie des condensas de vapeur en retour après utilisation, et l'eau déminéralisée. Cette eau est aspirée par une pompe et refouler dans le dégazeur pour éliminer l'oxygène O₂ qui existe dans l'eau. Ce dégazage se fait par deux méthodes en même temps :

- **La première méthode**

Consiste à faire un dégazage par la vapeur très basse pression (VBB = 0.8), on injecte la vapeur dans le dégazage, et grâce à un barbotage le O₂ dégage vers l'atmosphère.

- La deuxième méthode

On utilise dans cette méthode un produit chimique, le plus utilisable est l'hydrate d'hydrazine (N₂H₄), dont la réaction chimique, s'écrit comme suit :



Après ce phénomène de dégazage, les pompes aspirent l'eau du dégazeur et la refoule dans le ballon supérieur par le passage par l'économiseur.

- **Passage par l'économiseur**

L'économiseur reçoit l'eau d'alimentation refoulée par la ou les pompes alimentaires. Il est généralement situé sur le parcours des fumées, ce sont les fumées produites lors de la combustion qui cèdent leur chaleur à l'eau d'alimentation avant de passer au ballon supérieur.

- **Stockage dans le ballon supérieur**

L'eau venant de l'économiseur est stockée au niveau du ballon supérieur. Après, l'eau passe à travers des tubes appelés tubes écrans qui sont exposés directement aux flammes.

- **Passage par les surchauffeurs 1 et 2**

Si la température désirée de la vapeur n'est pas encore atteinte une valeur de 400°C à 405 °C ou si la vapeur contient encore des goûtes d'eau, on a recouru au surchauffeur. Il consiste à faire passer la vapeur par des serpentins dans la chambre de combustion, ces derniers seront exposés à la chaleur fournie par la fumée. Ainsi on aura de la vapeur.

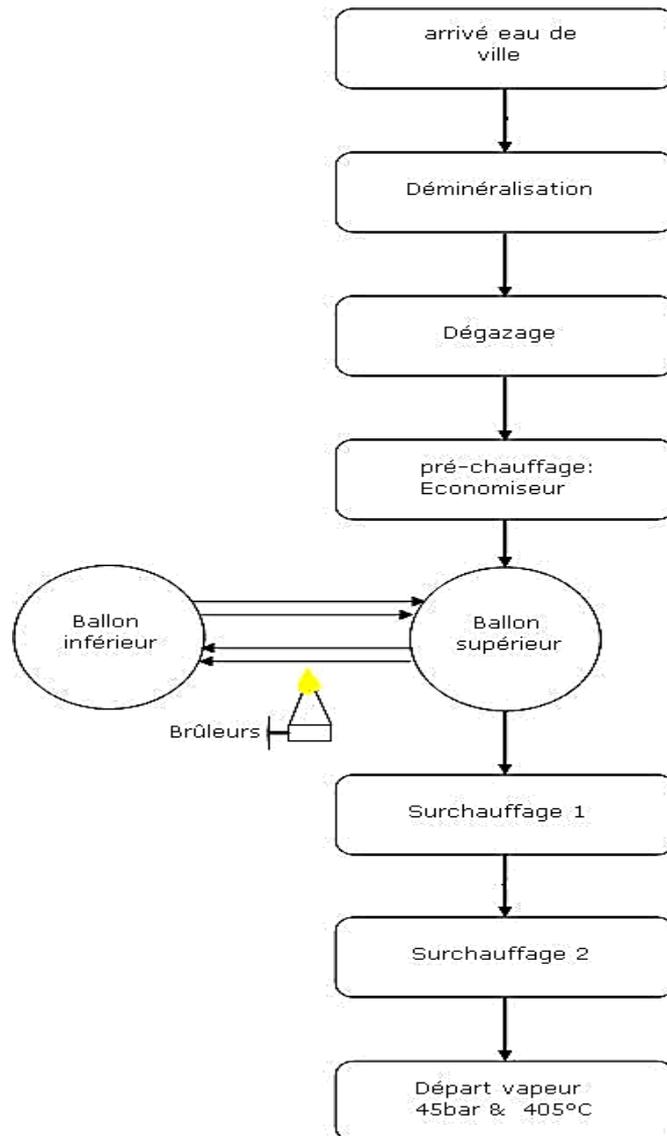


Figure (I-7) : Circuit Eau/Vapeur

V.2. b.2. Circuit Air/Gaz

Dans le circuit air/gaz, comburant (air) aspiré par le ventilateur de soufflage à l'atmosphère est envoyé dans les brûleurs. Il est ensuite envoyé dans la chambre de combustion. L'oxygène de l'air se combine alors avec le combustible Fioul Oïl (FO) en introduisant de la chaleur et les fumées. [6]

Ces fumées passent ensuite par les tubes de l'économiseur pour l'échauffement de l'eau d'alimentation avant d'être évacuées vers l'atmosphère. La figure (I-8) schématise ce circuit :

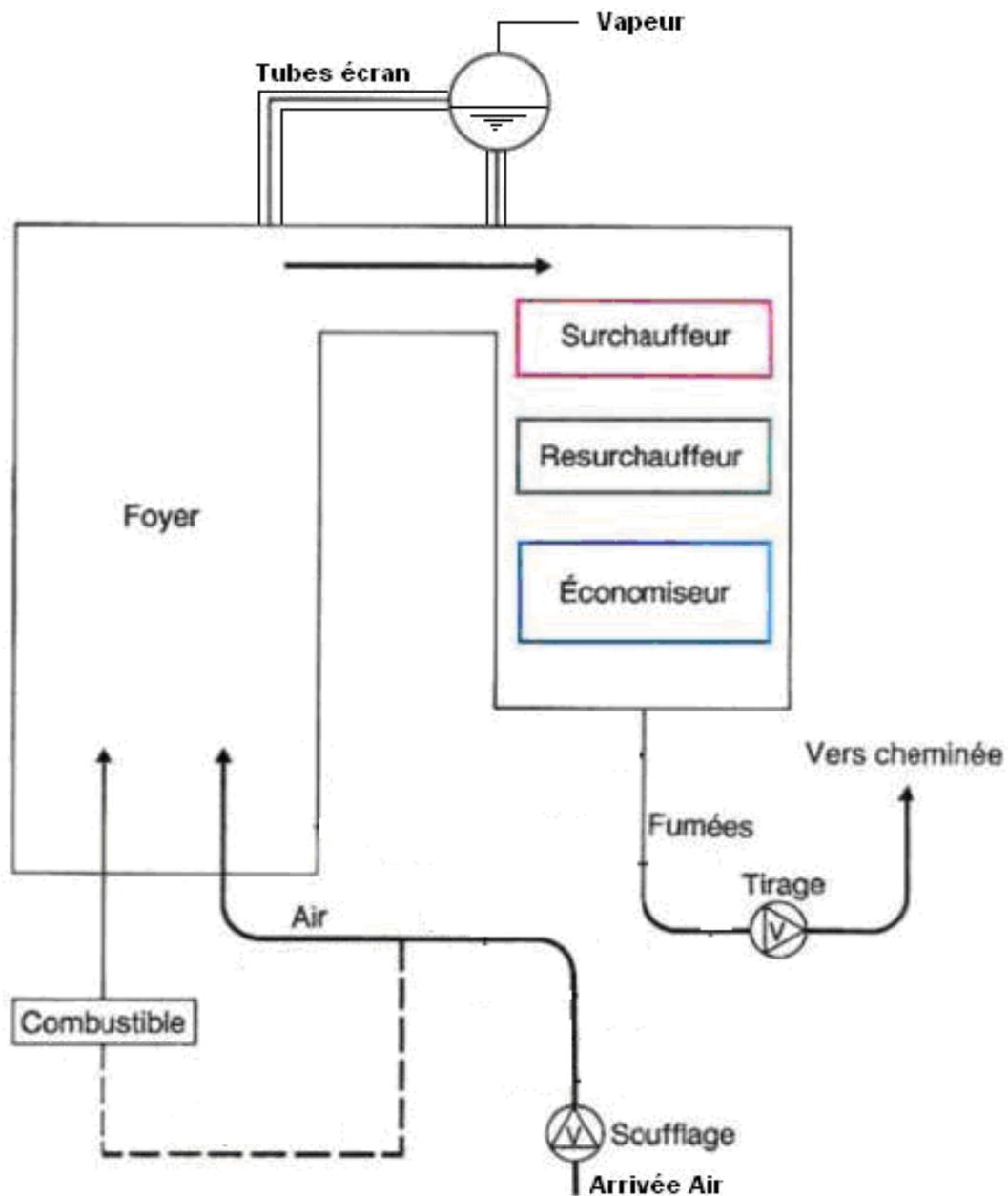


Figure (I-8) : Circuit Air/Fumée

V.2.c. Précautions

La formation de tartre dans les tubes serait préjudiciable au fonctionnement de la chaudière à tubes d'eau pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des chaudières à tubes de fumée. En outre, l'obturation des tubes pourrait se révéler dangereuse, ce qui ajoute à la nécessité de traiter l'eau de chaudière.

La paroi extérieure des tubes est exposée aux dépôts des suies et nécessite une action de ramonage pendant le fonctionnement de la chaudière. Cette action est obtenue par injection de vapeur ou d'air comprimé via un tube perforé. [6]

V.2.d. Production de vapeur surchauffée

Dans une chaudière à tubes d'eau, la tuyauterie qui prend en charge la vapeur saturée retourne dans le foyer, les gaz chauds apportent à cette vapeur saturée une énergie supplémentaire qui en élève la température sans en modifier la pression. On obtient ainsi de la vapeur surchauffée à la sortie. [6]

VI. Alimentation des chaudières

Curieusement il n'existe aucune prescription réglementaire sur les appareils d'alimentation des chaudières. Le bon sens exige qu'ils soient de puissance suffisante, en assez grand nombre et entraînés par des moteurs différents (électriques et vapeur) pour assurer en toutes circonstances l'apport d'eau nécessaire à la sécurité de fonctionnement.

On trouve encore pour l'alimentation des petites chaudières des pompes à plusieurs pistons entraînés par un moteur électrique.

Mais la majorité des appareils utilisés sont des pompes centrifuges simples ou multicellulaires pour les pressions élevées. Elles sont également entraînées par un moteur électrique, ou, dans les installations importantes, une turbine à vapeur.

Eu presque totalité les chaudières sont équipées de dispositifs d'alimentation automatique facilitant le maintien d'une position stable du niveau, nécessaire dans les générateurs modernes au taux de vaporisation élevé et à la réserve d'eau souvent faible.

Il existe deux familles d'appareils :

- Les régulateurs par tout ou rien
- Les régulateurs à action continue

Les premiers sont utilisés pour les chaudières de faible puissance. L'organe pilote est un flotteur ou un système à électrodes comme pour l'indication de niveau.

Il commande mécaniquement ou par un relais un commutateur qui provoque la mise en marche ou l'arrêt du moteur électrique.

Il est souhaitable que les variations du niveau qui résultent de ce mode d'alimentation ne soient pas trop grandes pour éviter les variations corrélatives de pression.

Les seconds s'imposent à toutes les chaudières d'une puissance horaire moyenne ou élevée. Les dispositifs de pilotage et de commande sont variés : flotteurs, éléments à dilatation, mesureurs du débit de vapeur, etc.... pour la première fonction ; transmission mécanique, à fluide auxiliaire, électrique pour la seconde. Au bout de la chaîne un clapet équilibré qui laisse passer plus ou moins d'eau dans la chaudière.

L'appareil d'alimentation ne peut être qu'une (ou plusieurs) pompe centrifuge pouvant supporter les variations de pression au refoulement qui résultent de l'ouverture plus ou moins grande du clapet.

Lorsqu'une chaudière est à alimentation automatique, quel que soit la catégorie, il est souhaitable qu'elle soit munie d'un appareil d'alarme.

Celui-ci doit être indépendant du dispositif de pilotage commandant l'alimentation. Si, de plus, elle est à conduite entièrement automatique le défaut d'alimentation doit provoquer l'arrêt du brûleur.

Pour éviter que l'eau de la chaudière reflue vers la pompe alimentaire lors de l'arrêt de celle-ci le règlement exige la présence d'un clapet de retenue. Celui-ci doit être placé sur la tubulure d'alimentation, le plus près possible de la chaudière. [7]

VII. Contrôle et limitation de pression

La pression à l'intérieur de la chaudière ne doit jamais dépasser la valeur indiquée par le timbre. Pour la contrôler on dispose :

VII.1. Le manomètre

Qui doit être placé de telle façon qu'il soit bien visible par le surveillant ou le chauffeur.

Cet appareil est basé sur la déformation élastique d'un élément métallique sous l'effet de la pression. Le plus répandu est celui à tube de section elliptique (dit de Bourdon). Dans sa déformation le tube entraîne une aiguille qui se déplace sur un cadran gradué en unités de pression. Le tuyau reliant le manomètre à la chaudière est généralement recourbé pour faciliter la formation d'un bouchon d'eau, empêchant la vapeur d'atteindre l'élément déformable en le protégeant de la chaleur.

Le manomètre est monté sur un élément de liaison comportant un robinet à trois voies avec purge et un ajutage avec bride ou raccord de fixation du manomètre étalon.



Figure (I-9) : le manomètre

Le dispositif permet soit d'isoler le manomètre soit de purger sa tubulure de communication soit de comparer ses indications avec celles du manomètre étalon préalablement fixé sur la bride ou le raccord prévu.

La purge d'un manomètre est à faire moins fréquemment que celle d'un niveau mais ne doit pas être négligée. Il est conseillé de la faire une fois par semaine sur les chaudières dont l'eau est traitée.

On doit mettre à profit cette opération pour s'assurer que, le manomètre étant isolé, l'aiguille revient bien à zéro. Il va de soi que toute anomalie constatée doit entraîner une intervention immédiate permettant d'y mettre fin.

Le cadran du manomètre doit porter à la graduation convenablement une marque très apparente (trait rouge par exemple) indiquant la pression à ne pas dépasser (timbre). [7]

VII.2 La soupapes de sûreté

Pour éviter ce dépassement, elles doivent évacuer à l'atmosphère l'excès de vapeur éventuel.

Elles sont constituées pour l'essentiel d'un clapet normalement appuyé sur son siège par un poids ou un ressort et empêchant l'échappement de la vapeur, tant que la pression limite prévue n'est pas atteinte.

Lorsque cela se produit la force exercée par la vapeur sur le clapet l'emporte sur celle produite par le poids ou le ressort. Le clapet se soulève permettant la sortie de la vapeur jusqu'à ce que la pression revienne au-dessous de la valeur de réglage.



Figure (I-9) : soupapes de sûreté

Aux chaudières à haute pression, pour permettre une plus grande précision, la levée du clapet se fait par l'intermédiaire d'un piston monté dans le corps de la soupape et d'un diamètre sensiblement plus grand que le clapet.

La vapeur est admise sous le piston par l'intermédiaire d'un « clapet pilote » qui s'ouvre lorsque la pression limite est atteinte. Ces soupapes sont dites « assistées ».

Le réglage des soupapes est un facteur important de sécurité. Aussi est-il rigoureusement interdit de la modifier soit en surchargeant le contre poids soit en augmentant la tension du ressort.

L'échappement de la vapeur à la sortie des soupapes doit être canalisé pour éviter que des projections d'eau atteignent le personnel. Mais la gaine ou le tuyau ne doivent pas gêner son écoulement. Le règlement précise que la pression à la chaudière ne doit pas excéder de plus de 10% le timbre pendant le fonctionnement des soupapes.

Il convient de noter que dans les installations à fonctionnement automatique les variations de pression commandent le débit de combustible.

A la pression maximale un « manostat » coupe l'alimentation du brûleur, ce qui évite pratiquement tout déplacement du timbre. Un tel dispositif ne dispense pas pour autant des soupapes de sûreté. [7]

VIII. Autres dispositifs de sécurité sur les chaudières

VIII.1. Vanne d'arrêt de vapeur

Elle n'a pas une fonction permanente de sécurité. Mais elle est indispensable pour permettre d'isoler un générateur du circuit qu'il dessert en cas d'incident ou d'accident sur ce dernier. Il est recommandé de la manœuvrer régulièrement et d'éviter de la bloquer en fin de course par une couverture trop brutale.

VIII.2. Vanne de vidange

Même remarque que pour la précédente. Cette vanne est au point bas de la chaudière. Son étanchéité est à vérifier fréquemment surtout aux chaudières à fonctionnement discontinu arrêtées la nuit.

VIII.3. Clapet de retenue de vapeur

Il s'agit d'un clapet ayant une fonction analogue à celui disposé sur l'alimentation en eau. Il n'est exigé par le règlement sur les tubulures de sortie que lorsque plusieurs chaudières alimentent en vapeur un même collecteur.

En cas d'avarie importante à une de ces chaudières il empêche la vapeur produite par les autres de refluer vers elle. Il n'est pas imposé lorsque les prises de vapeur ont un diamètre inférieur à 80 mm

VIII.4. Fermeture automatique des foyers et des cendriers

Aux chaudières à tubes d'eau la rupture d'un tube peut entraîner un flux de vapeur et de gaz brûlants vers l'extérieur ou même la projection de charbon incandescent lorsqu'on utilise ce combustible.

Pour éviter ce risque le règlement prévoit que tous les orifices, portes et regards, doivent être munis de dispositifs à volet équilibré se fermant automatiquement sous l'effet du flux. L'encore on remarquera que le nombre de chaudières concernées a diminué rapidement avec la généralisation des parois étanches. [7]

IX. Importance et modalités de l'entretien

L'entretien contribue dans une large mesure à maintenir les caractéristiques de fonctionnement initiales des chaudières et à assurer leur longévité.

Il comporte deux postes principaux :

- Le nettoyage des surfaces d'échange au contact des gaz
- La protection contre les dépôts de tartre des surfaces baignées par l'eau et leur élimination Éventuelle.

Il comprend également la « maintenance » des équipements annexes devenus de plus en plus Importants et perfectionnés. [7]

X. Nettoyage des surfaces cote gaz

Ces surfaces se couvrent progressivement de suies et de cendres qui gênent la transmission Calorifique et provoquent une augmentation de la température des fumées.

Il convient de les enlever dans toute la mesure du possible. On procède pour cela à des ramonages. [5]

I. Introduction

La vapeur a beaucoup d'application tant dans l'industrie que dans la vie courante. Mais nous nous intéresserons à ses applications industrielles plus précisément dans les centrales thermiques.

Les installations industrielles à vapeur sont en générale constituées :

- D'une chaudière (générateur de vapeur): représente la source chaude de l'installation. elle a pour rôle la production de la vapeur nécessaire au fonctionnement de l'installation.
- D'une turbine où la vapeur vient se détendre en cédant une partie de son Énergie sous forme de travail.
- D'un condenseur : représente la source froide de l'installation. Son rôle Consiste à : - Condenser la vapeur provenant directement de la chaudière
 - Maintenir un niveau assez bas à la sortie de la turbine
- D'une pompe d'ou son rôle consiste à : - Alimenter la chaudière à vapeur
 - Elever la pression de l'eau liquide.

II. La vapeur

II.1. Définition

La vapeur est l'état gazeux de l'eau, l'évaporation de l'eau est le changement de phase et d'état de l'eau du liquide à l'état gazeux qui peut être utiliser dans plusieurs domaine domestique et industrielle. [8]

La vapeur est produite dans des chaudières chauffées par un combustible fossile, parfois électriques, ou bien plus généralement par ébullition de l'eau mise au contact d'une source chaude

II.2. Utilisation industrielle

L'industrie a fait de nombreux usages de la vapeur d'eau ; principalement comme fluide caloporteur ou pour le fonctionnement de machines à vapeur (voir en particulier la turbine à vapeur, la locomotive à vapeur). Accessoirement, sa détente est utilisée dans des éjecteurs à vapeur servant à pomper des fluides (pour faire le vide, par exemple), ou dans des sirènes ou sifflets. On utilise aussi ses propriétés de transfert de chaleur pour les procédés de stérilisation. [8]

II.3. Thermodynamique classique de la vapeur

La base essentielle pour l'étude du transfert thermique lors de l'ébullition est la thermodynamique de changement de phase. Dans la pratique, on considère que le système est à l'équilibre thermodynamique quand la température du système est uniforme

II.4. Relation entre les phases liquide et vapeur

L'analyse du transfert thermique en changement de phase entre liquide et vapeur dans la conception d'une chaudière ou d'un condenseur exige une compréhension du principe d'équilibre des deux phases. Pour faciliter la compréhension, nous avons présenté brièvement les aspects généraux de l'équilibre vapeur-liquide d'une substance pure.

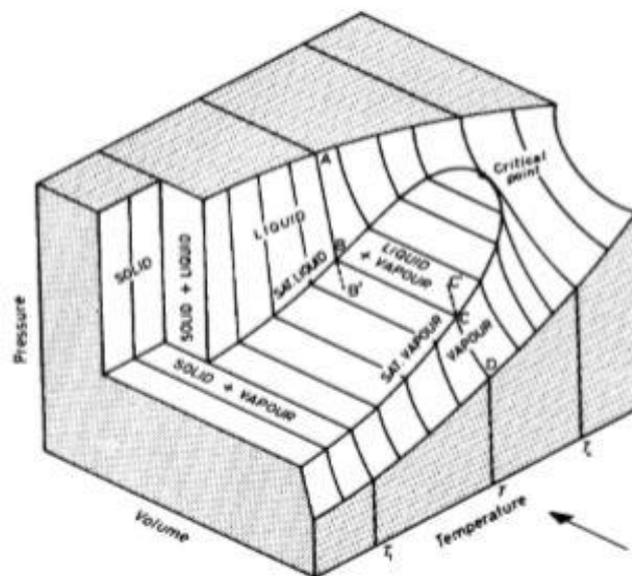


Figure (II-1) : Relation entre pression, volume et température

Le rapport entre la pression, le volume, et la température pour une substance pure est illustré schématiquement dans la figure 1 ; Les phases indiquées sont solides, liquide et vapeur. La ligne ABCD représente la pression par rapport au volume pour une température donnée (T). Dans la région AB, la substance existe comme liquide ; dans la zone BC, la substance existe comme mélange diphasique de vapeur et de liquide (dans un équilibre thermodynamique) ; Et dans la zone CD, la substance existe comme vapeur.

Il est possible au liquide d'exister dans un état surchauffé aux pressions au-dessous du point B, la limite étant indiquée par le point B'. De même, il est possible que la vapeur existe dans un état surchauffé ; état sursaturé à une limite indiquée par le point C'.

Dans ces conditions, le liquide ou la vapeur est décrit en étant métastable. Une description plus détaillée de ces états métastables est illustrée dans la figure (II.2)

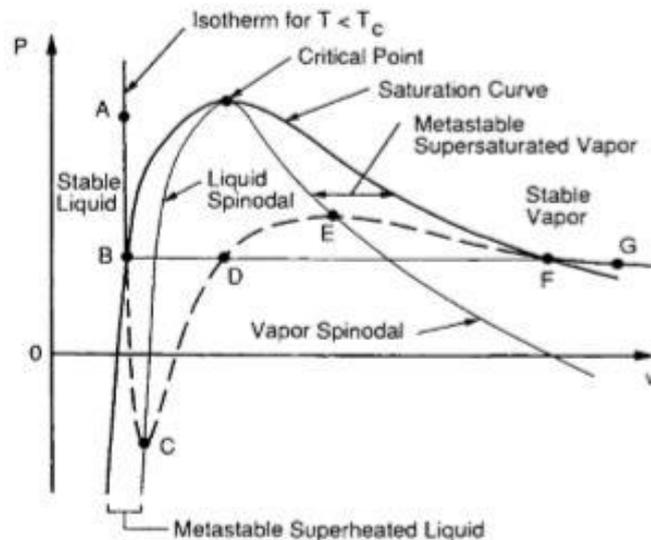


Figure (II.2) : Relation entre la pression et le volume

Ici, la ligne ABDFG représente le rapport pression-volume pour une température plus basse que la température critique. La phase liquide peut exister dans un état métastable suivant la ligne BC et la phase de vapeur peut pareillement exister suivant la ligne EF.

La ligne en pointillée CDE représente la région instable ; les points C et E, représentant les limites de la région métastable, sont habituellement désignés sous le nom des points spinodales. L'ensemble de ces points regroupés (pour différentes isothermes), nous donnent les lignes spinodales liquide et vapeur

La relation P-V-T est également indiquée sur une courbe P-T représentée sur la figure(II-3). Cette courbe de vapeur-pression se terminant au point critique sépare l'état monophasique sous refroidit de la région liquide à gauche de la courbe et la région de vapeur surchauffée vers la droite.

Le mélange diphasique de liquide et de vapeur existe sur la courbe ; l'état supercritique est identifié dans la région là où la température et la pression dépassent les valeurs critiques respectives. [9]

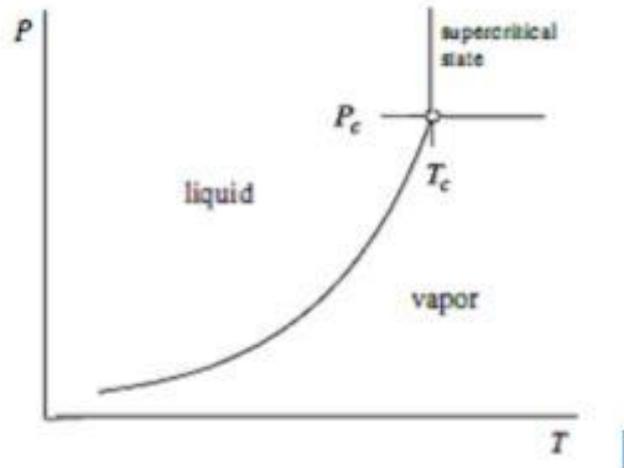


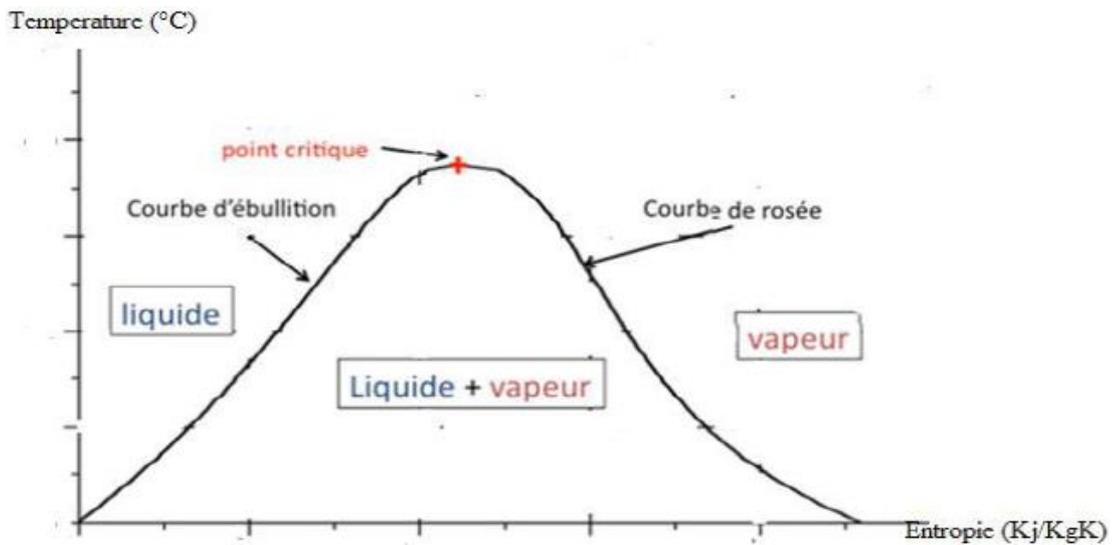
Figure (II.3) : Diagramme pression-température

III. Diagramme entropique

Ce diagramme est utilisé principalement pour l'étude des cycles de machines à vapeur. C'est une représentation graphique de toutes les évolutions qu'un fluide peut subir. Ce diagramme est Organisé de la manière suivante :

- Sur l'axe des abscisses, on trouve l'entropie massique S exprimée en KJ/Kg. K
- Sur l'axe des ordonnées, on trouve la température T exprimée en $^{\circ}\text{C}$
- Ce diagramme est divisé en trois zones par une courbe dite courbe de saturation au Sommet de laquelle se trouve un point critique qui sépare la partie du liquide saturé De celle de la vapeur saturée :

- La partie liquide sous refroidi se trouve à gauche de la courbe d'ébullition
- La zone à l'intérieur de la courbe de saturation correspond à la phase de Changement d'état (mélange liquide-vapeur).[10]
- L'espace vapeur se trouve à droite de la courbe de rosée

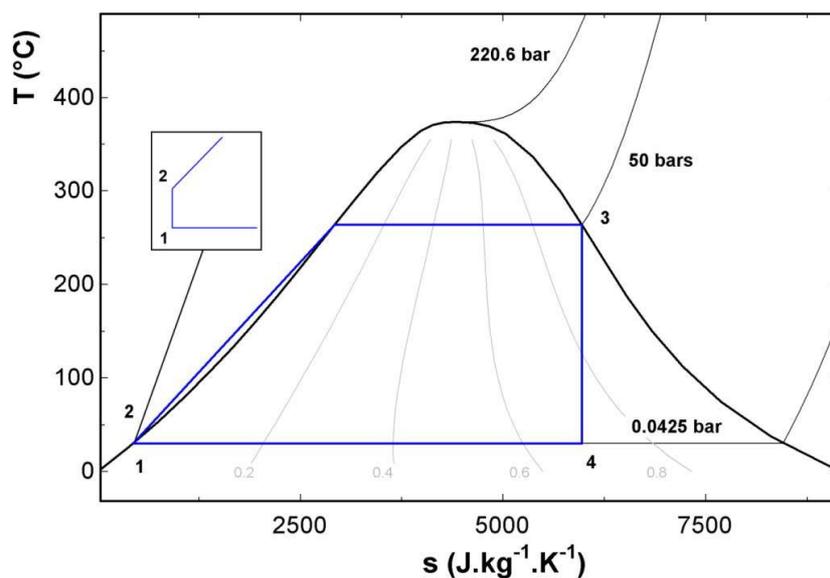


Figure(II-4): Diagramme entropique (T, S) de l'eau.

IV. Cycle de Rankine/Hirn

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur qui convertit la chaleur en travail mécanique. C'est le cycle thermodynamique le plus utilisé pour la génération D'électricité. La chaleur est fournie extérieurement à une boucle fermée qui utilise l'eau comme fluide de travail. Selo, les moteurs à vapeur d'eau génèrent environ 90 % d'électricité consommée dans le monde.

Le cycle porte le nom de William John Macquorn Rankine (1820-1872) [11], un ingénieur civil, physicien, mathématicien Ecossois.



Figure(II-5) : Cycle idéal de Rankine dans le diagramme T-s de l'eau

Le cycle de base de Rankine peut être vu comme une modification du cycle de Carnot. D'un point de vue technique, les procédés de compression et de détente diphasiques demandés par le cycle de Carnot ne sont pas pratiques [12]. Le cycle de Rankine (Figure II-5) diffère du cycle de Carnot par la compression isentropique du liquide, suivie d'une transformation isobare de chauffage en chaleur sensible puis de chauffage en chaleur latente [13].

Le cycle idéal de Rankine est un cycle tel que présenté la Figure II-5, dans lequel le fluide de travail traverse les composants du cycle sans irréversibilités. En particulier : la chute de pression est absente dans la chaudière, le condenseur et les conduites. La turbine et la pompe sont considérées isentropiques. Les procédés du cycle sont des procédés réversibles tels que détaillés ci-dessous :

- La compression isentropique dans la pompe (la distance verticale entre les points 1 et 2 est considérablement exagérée pour soucis de clarté)
- L'addition de la chaleur à pression constante dans l'évaporateur
- L'expansion isentropique du fluide de travail de l'état de vapeur saturée à la pression du condenseur dans la turbine
- L'enlèvement de chaleur dans le condenseur fonctionnant à pression constante

L'inconvénient principal du cycle de Rankine provient de la détente isentropique 3-4 dans le domaine diphasique ; cette détente correspondant à une marche en régime humide et donc sujette à des limitations technologiques (érosion d'aubage de la turbine si le titre en vapeur s'éloigne trop de la saturation vapeur : $x < 1$) [13].

Pour obtenir en sortie de la turbine une vapeur saturée ($x = 1$), Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890), un ingénieur français, a proposé d'introduire en turbine une vapeur surchauffée [14] (Figure II. 6).

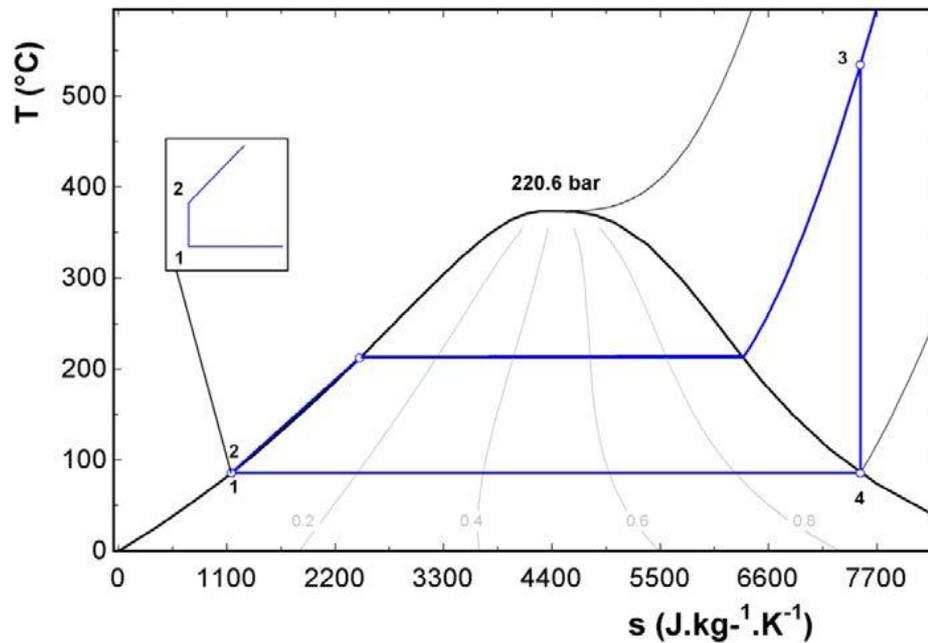


Figure (II-6) : Cycle idéal de Hirn dans le diagramme T-s de l'eau

Le cycle idéal de Rankine/Hirn se réfère à la configuration simple du cycle de Rankine montrée dans la Figure (II-6) fonctionnant avec des composants sans irréversibilités à laquelle une étape de surchauffe de la vapeur est ajoutée.

Le bilan énergétique du cycle est décrit par les équations suivantes :

Pour la Pompe :

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

Pour la Chaudière

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

Pour la Turbine

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

Condenseur

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

Travail net du cycle

$$W_{net} = W_t - w_p = Q_h - Q_c \quad (\text{II.5})$$

Rendement du cycle

$$\eta_{Rankine} = W_{net} / Q_h \quad (\text{II.6})$$

Le cycle réel de Rankine diffère de cycle idéal en raison des irréversibilités dans les composants du cycle. Nous illustrons sur la Figure II- 7. Les irréversibilités et les pertes sont présentées avec les quatre sous-systèmes du cycle de Rankine [15] :

- *Irréversibilité dans la pompe* : le pompage est accompagné d'une augmentation de l'entropie. Le travail demandé par le procédé réel est donc plus important que dans le cas du procédé idéal. Le transfert de chaleur entre le fluide traversant la pompe et l'environnement est souvent négligé et la pompe est alors considérée adiabatique. L'irréversibilité dans la pompe est donc caractérisée par le rendement isentropique :

$$\eta_{is,p} = \frac{W_{is}}{W_r} = \frac{h_{p,out}^{is} - h_{p,in}}{h_{p,out} - h_{p,in}}$$

- *Irréversibilité dans la turbine* : similaire au procédé de pompage, l'irréversibilité du procédé de détente est également caractérisée par un rendement isentropique de la turbine.

Le transfert de chaleur entre le fluide traversant la turbine et l'environnement est souvent négligé et la turbine est alors considérée adiabatique. Le travail produit par le procédé de détente réel est plus petit que le travail dans le cas d'un procédé isentropique.

$$\eta_{is,t} = \frac{W_r}{W_{is}} = \frac{h_{t,in} - h_{t,out}}{h_{t,in} - h_{t,out}^{is}}$$

- *Frottement du fluide de travail* : les frottements internes et les frottements avec les parois inhérentes à l'écoulement du fluide de travail causent des chutes de pression dans la chaudière, le condenseur et les tuyaux de liaisons entre les composants du cycle. Pour compenser ces chutes de pression, le fluide de travail doit être pompé à une pression plus élevée que la pression demandée par le cycle idéal. Cela agrandit la taille de la pompe et donc sa puissance.
- *Irréversibilités liées aux transferts de chaleur* dans la chaudière et le condenseur. Dans la situation idéale, les sources et puits de chaleur sont supposées être, au niveau de la chaudière et du condenseur, à des températures identiques aux températures du fluide qui traverse le cycle. Dans la situation réelle, les différences de température doivent exister afin de permettre les transferts de chaleur. Ces différences de température sont

synonymes de créations d'entropie et donc d'irréversibilités. Les encrassements au niveau de la chaudière et du condenseur augmentent les gradients de température nécessaires aux transferts et augmentent donc les irréversibilités. Toutefois, on peut considérer que ces irréversibilités sont des irréversibilités externes, liées aux sources et puits de chaleur, et ne considérer que les irréversibilités dites internes du cycle (pompe, turbine, frottements). Si ces derniers composants fonctionnent de manière réversible, le cycle serait dit alors « intérieurement réversible ».

- *Perte thermique* : les pertes thermiques causées par le transfert de chaleur entre le fluide de travail circulant dans l'installation avec l'environnement influencent directement le bilan au sens du premier principe. Elles peuvent être vues comme des irréversibilités internes du système car le transfert de chaleur vers l'extérieur est opéré sous un gradient non nul. Cette perte de chaleur se situe dans les tubes de liaisons entre les composants du cycle. Les éventuelles pertes thermiques qui se situent dans les composants du cycle se traitent au niveau de chacun de ceux-ci qui fonctionnerait alors de manière adiabatique ou non. Pour compenser toutes ces pertes thermiques indésirables, plus de chaleur doit être transférée au fluide de travail dans la chaudière [15].

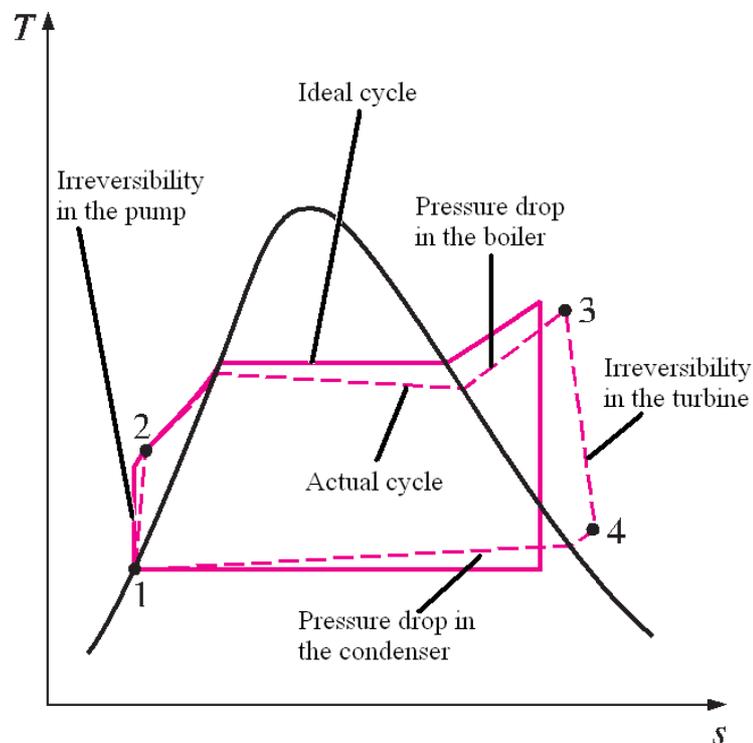


Figure (II.7) : Ecart entre le cycle à vapeur réel et le cycle de Rankine idéal [16]

L'effet des irréversibilités sur la performance du cycle est illustré par les expressions suivantes :

Cycle idéal	Cycle réel
$W_{net} = W_t - W_p$	$W_{net} = \eta_{is,t} W_t - \frac{W_p}{\eta_{is,p}} - W_{p,comp}$
$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_h}$	$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_h + Q_{loss}}$

Où

$W_{p,comp}$ est le travail additionnel nécessaire de la pompe pour compenser les chutes de pression du fluide de travail à travers des tuyaux et les composants du cycle.

Q_{loss} est la quantité de chaleur additionnelle nécessaire pour compenser la perte thermique du fluide de travail à travers le cycle (excluant le condenseur) à cause du transfert de chaleur entre le fluide de travail et l'environnement. [15]

V. Généralités sur la combustion

Généralement la chaleur produite par combustion n'est jamais totalement transférée ou récupérée par le fluide qu'on désire chauffer, car il existe toujours des pertes dues aux différents facteurs.

Plusieurs paramètres influencent la valeur de ce rendement, dont la température et la pression d'entrée de l'eau, du comburant et du fuel, la nature de l'eau entrante, le niveau de l'eau dans la chaudière, voir même la variation de la demande en consommation de la vapeur.

Une étude détaillée de tous ces paramètres s'avère nécessaire. Pour cela une méthode primitive générale sera effectuée comparant initialement la production et la consommation en fuel. Puis une autre beaucoup plus précise traitant quasiment toutes les pertes existantes. En parallèle, une étude des variations des différents paramètres mesurés sera réalisée, dans le but de visualiser des fluctuations du fonctionnement de la chaudière et de chercher l'existence d'éventuelles fuites et anomalies.

V.1. Définition

La combustion est la combinaison chimique d'un combustible avec l'oxygène de l'air : réaction chimique d'oxydation.

Cette combinaison est accompagnée d'un fort dégagement de la chaleur. La combustion apparaît le plus souvent sous forme d'une flamme dans laquelle s'effectuent les réactions d'oxydations.

V.2. Caractéristique est composition chimique du fuel

Les fuels sont des mélanges d'hydrocarbures avec comme constituants principaux le carbone et l'hydrogène. Mais aussi suivant leur origine ils renferment des teneurs relativement importantes en soufres, en azote, en cendres minérales et en eau. Ceux sont généralement des produits extraits de pétrole bruts mais ils peuvent être également des huiles de goudron de houille.

Cependant il existe plusieurs catégories du fuel, par exemple le fuel lourd n°2. Qui se compose de 85% de carbone, 11% d'hydrogène, 2.5% de soufre, 0.7 d'oxygène, 0.8 d'azote. Il est caractérisé par certaines propriétés dont les plus importantes sont :

La densité : elle est généralement mesurée à 15° ainsi elle est très utile pour les mesures de combustibles effectuées suivant des méthodes volumétriques.

Pouvoirs calorifiques : c'est la quantité de chaleur libérée par la combustion complète d'un kilogramme du fuel quand les gaz sont ramenés à la même température que les réactifs. On distingue deux types de pouvoirs calorifiques.

- Le pouvoir calorifique inférieur, noté PCI. Pour lequel l'eau est présente dans les gaz sous forme de vapeur.
- Le pouvoir calorifique supérieur, noté PCS, pour lequel l'eau se trouve sous forme condensée dans les gaz produits.

Ces deux pouvoirs calorifiques peuvent être déterminés pour une combustion complète à volume constant à pression constante ou mixte. Ils sont liés par la relation suivante

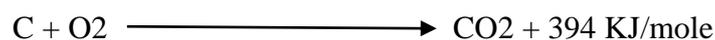
$$PCS = PCI + Lv$$

Avec : Lv la chaleur latente de vaporisation de l'eau

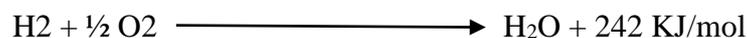
La viscosité : elle est importante en ce sens qu'elle influence la qualité de la combustion à travers la pulvérisation et le pompage du fuel.

Point éclair : c'est la température pour laquelle le fuel émet suffisamment de vapeur au travers d'un orifice pratiqué dans le couvercle d'un creuset standard pour qu'on puisse enflammer le mélange air-vapeur provoqué.

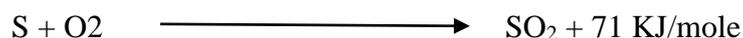
La combustion du carbone et de l'oxygène donne naissance au gaz carbonique.



La combustion de l'hydrogène et de l'oxygène donne naissance à la vapeur d'eau.



La combustion du soufre et de l'oxygène donne naissance au gaz du dioxyde de soufre.



VI. Le transfert de chaleur dans les chaudières à vapeur

Un générateur de vapeur est un mélange complexe des trois modes d'échanges de Chaleur (rayonnement, convection, conduction). La dominance des échanges par convection et rayonnement diminue l'importance de la conduction. Dans un premier temps, les méthodes de calculs pour les modes de transfert de chaleur sont présentées indépendamment. Dans un deuxième temps, les méthodes de calculs sont combinées dans le but de faire un bilan global dans un générateur de vapeur.

VI.1. Rayonnement dans une chaudière à vapeur

Une chaudière est chauffée par réaction chimique d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide avec de l'air dans la chambre de combustion. Cette réaction chimique donne naissance à une flamme et à des produits de combustion (fumée). Dans une chambre de combustion (~1000°C) les gaz avec les molécules à trois atomes participent de façon significative dans l'échange radiatif (CO_2 , H_2O). La couleur de la flamme provient des petites particules imbrûlées (liquide ou solide) dans les produits de la réaction (fumées). [15]

VI.2. Convection dans une chaudière à vapeur

Les fumées issues de la réaction de combustion échangent de la chaleur le long des Tubes jusqu'à la sortie du générateur. En plus d'échanger par rayonnement, elles échangent par convection :

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{II.7})$$

Le calcul du coefficient de convection (h) dépend des propriétés thermo physiques du fluide (Fumée), de la température, de la vitesse et de la géométrie. [15]

VI.3. Conduction dans les chaudières à vapeur

La conduction dans un générateur est présente mais n'est pas dominante. Afin d'accroître la précision des calculs, le calcul de la conduction dans la chambre de combustion est nécessaire dû à la présence de réfractaire. Le réfractaire est un bon isolant, il est couramment utilisé pour la protection des tubes proches des flammes. De plus, les pertes de chaleur d'une chaudière dépendent directement de l'épaisseur d'isolation (conduction). La distribution du flux au travers des tubes et du réfractaire est équivalent à deux murs superposés ce qui correspond à deux épaisseurs et deux conductivités différentes, représenté à la figure (Figure II.1)

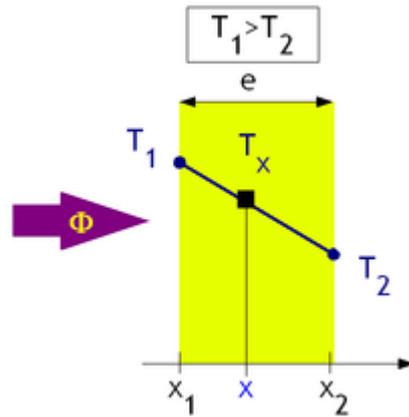


Figure II.8 : Distribution de la température avec flux constant

La conduction au travers des tubes ne représente qu'une toute petite partie de l'échange Total. Si on met en équation la résistance totale au travers des tubes (figure III.1), on obtient :

$$R = \frac{1}{he} + \frac{e}{k} + \frac{1}{hi} \quad (\text{II.8})$$

Le coefficient convectif pour un changement de phase est de l'ordre de 10000W/m K [4],

La résistance thermique côté changement de phase est donc négligeable dans l'équation (III.2) de plus, le terme de la résistance thermique totale représentant la conduction est lui aussi très petit car la paroi du tube est mince. Il ne reste que le terme de résistance thermique représentant la convection des fumées de combustion sur les tubes qui possède une importance prépondérante sur les deux autres. Une approche rigoureuse utilise tout de même la résistance thermique totale. [15]

VII. Les méthodes de calcul du rendement

Le rendement d'une chaudière est le rapport entre l'énergie produite et l'énergie introduite, il est calculé par deux méthodes différentes :

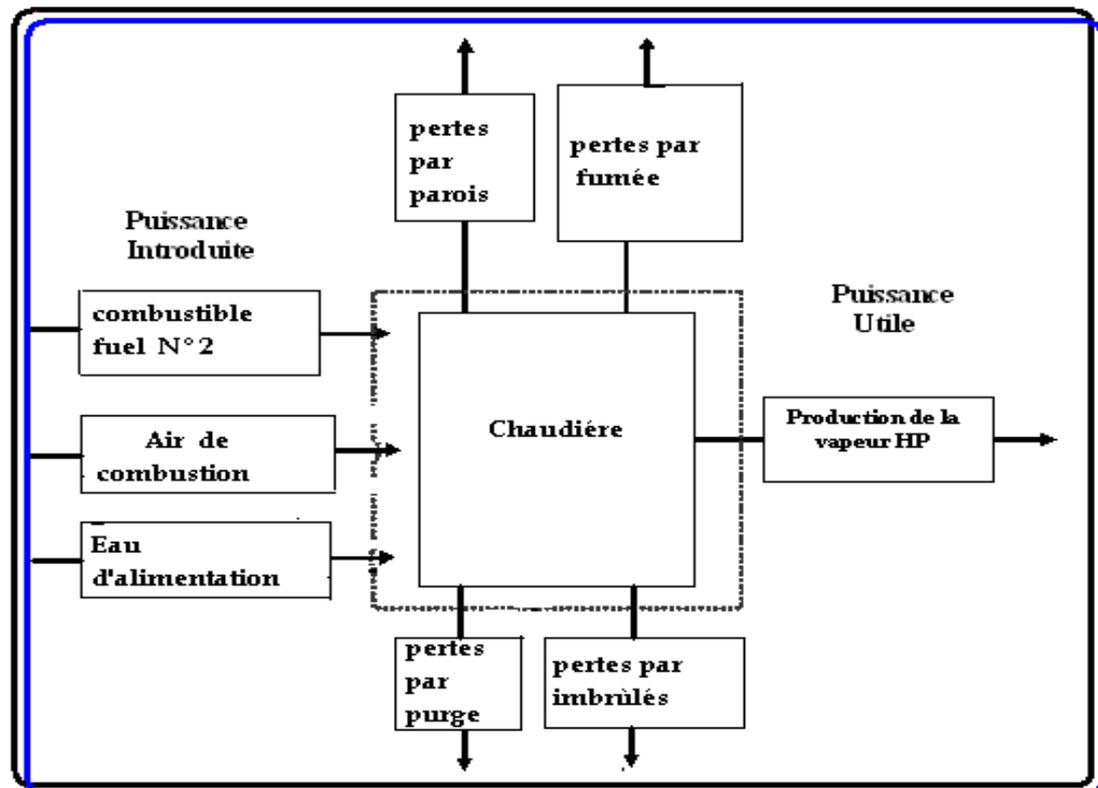


Figure II.9: Bilan d'énergie du système chaudière

VII.1 Première méthode

Le rendement est défini comme étant le rapport entre l'énergie produite utile et l'énergie totale introduite. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta = \text{Energie utile} / \text{Energie introduite}$$

La puissance utile est calculée par la formule :

$$QU = \sum D_s h_s - \sum D_i h_i \quad (\text{II.9})$$

Avec : h_i (kJ/kg) : enthalpie de l'eau entrante.

h_s (kJ/kg) : enthalpie de la vapeur sortante.

D_i (kg/s) : débit de l'eau entrante.

D_s (kg/s) : débit de la vapeur sortante.

VII.1.1. Les puissances introduites dans la chaudière

Les puissances introduites sont de différentes natures, la principale provenant du combustible.

VII.1.1.a. Puissance introduite sous forme d'Enthalpie de formation du combustible :

Il s'agit du Pouvoir Calorifique Inférieur du fioul lourd N°2 :

$$\text{PCI} = 9600 \text{ kcal/kg} \quad [4]$$

Pour obtenir la puissance, il suffit de multiplier par le débit de combustible.

Cette puissance est exprimée par :

$$Q_1 = \text{PCI} \times D_{\text{fuel}} \quad (\text{II.10})$$

Avec : D_{fuel} : le débit de combustible.

VII.1.1.b. Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fioul

Etant donné que le fioul est préchauffé avant son admission dans la chambre de combustion, il possède donc une chaleur sensible. Effectivement ce préchauffage est assuré à l'aide de serpentins alimentés en vapeur comme on l'a déjà signalé précédemment.

Le but de ce préchauffage est d'avoir une bonne combustion résultant d'une diminution de la viscosité du fioul.

Cette puissance est exprimée par :

$$Q_{\text{fioul}} = Q_2 = D_{\text{fioul}} C_m (T_{\text{af}} - T_r) \quad (\text{II.11})$$

Avec : D_{fioul} : débit de fioul (kg/h)

C_p : chaleur spécifique moyenne du fuel à pression constante en kcal/ kg. K

T_{af} : Température d'admission du fioul

T_r : Température de référence.

VII.1.1.c. Puissance introduite sous forme de chaleur sensible de l'air comburant

Même dans le cas de l'absence d'un système de préchauffage, la température de l'air à l'entrée de la chaudière est supérieure à celle l'ambiante, ceci résulte du fait de la mise sous pression de l'air par les pompes d'aspiration. Cet air qui est aspiré du milieu ambiant est de l'air humide (mélange d'air sec et de vapeur d'eau).

Cette puissance est exprimée par :

$$Q_a = Q_3 = D_a C_{pa} (T_{aa} - T_r) \quad (\text{II.12})$$

Avec : D_a : débit d'air (Kg/h)

C_{pa} : chaleur spécifique moyenne de l'air à Pression constante et à une température moyenne en kcal/ kg°K

T_{aa} : température d'aspiration de l'air °C.

T_r : Température de référence

la puissance globale introduite dans les chaudières :

$$\text{On a :} \quad Q_{in} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{II.13})$$

Tel que :

$Q_1 = D_{fuel} PCI_{fuel}$ Puissance provenant de l'enthalpie de formation du combustible.

$Q_2 = Q_{fuel} = D_{fuel} C_{pfuel} (T_{fuel} - T_r)$ Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fioul.

$Q_3 = D_a C_{p\ air} (T_{aa} - T_r)$ la puissance apportée par l'air.

VII.2. Deuxième méthode

La quantité de chaleur perdue constitue l'écart entre l'énergie totale introduite et l'énergie utile reçue par l'eau de la chaudière. Elle regroupe principalement :

- Les pertes par fumées.
- Les pertes par parois.

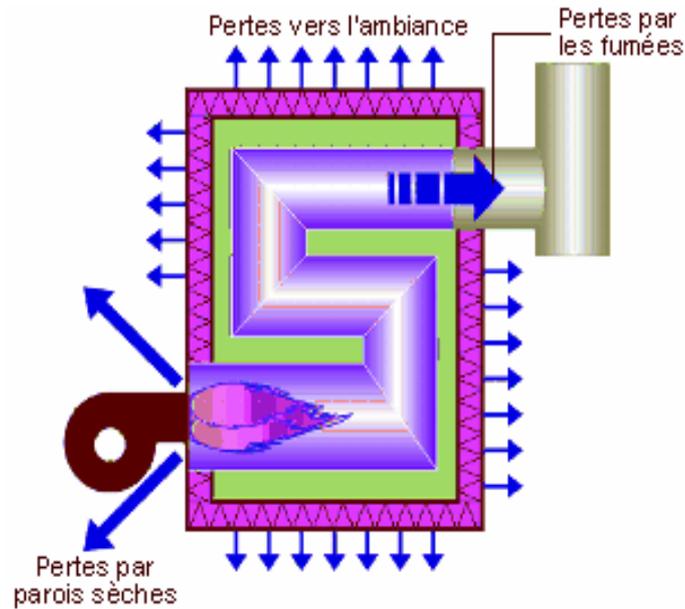


Figure (II.10) : Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement

VII.2.1. Pertes par fumées

Les pertes par les fumées proviennent :

- De la chaleur sensible contenue dans les fumées qui sont nettement plus chaudes que l'air aspiré dans la chaufferie.
- Des imbrûlés issus d'un mauvais mélange entre l'air et le combustible, provoquant la production de CO au lieu de CO₂ (la chaleur dégagée est alors inférieure à celle fournie par une combustion complète).

Une augmentation des pertes par les fumées peut provenir soit d'un mauvais excès d'air qui peut être dû à :

- Un mauvais réglage au niveau du brûleur.
- Des problèmes d'entretien tels qu'une mauvaise distribution de l'air ou une mauvaise pulvérisation du fioul.

Les trois mesures T_f , T_a et %CO₂ étant faites, on évalue les pertes par chaleur sensible dans les fumées en pourcentage du PCI à l'aide de la formule de Siergert suivante : [4]

$$Pertes = \frac{K \times (T_f - T_a)}{\%CO_2} \quad (II. 14)$$

Avec :

T_f : température des fumées

T_a : température de l'air ambiant.

$\%CO_2$: teneur en CO_2 des fumées (en %).

K est le coefficient de Siergert varie avec le combustible.

Il est déterminé par la formule : $K = 0,008 * \%CO_{2max} + 0,48$

Pour le fioul n°2 K est d'environ 0.56

VII.2.2. Pertes par parois

Elles sont dues aux échanges thermiques par rayonnement et par convection entre l'air ambiant et les parois de la chaudière. Ces pertes dépendent des dimensions des parois et de la nature de leurs matériaux de construction. Elles sont exprimées par la relation suivante : [6]

$$Q_P = P' \times C \times \frac{P_M}{P} \quad (II.15)$$

C : Coefficient d'écran ($C = 0.75$)

P' : Valeur de la perte par parois à la M, exprimée en pourcentage du PCI du fioul consommé.
($0.59 < p' < 0.6$)

P_M : Puissance maximale de la chaudière

P : Puissance de la chaudière lors de l'essai

Rendement de la combustion

Lorsqu'on ne tient compte que des pertes par fumées, le rendement obtenu est appelé « rendement de la combustion » calculé par la relation suivante :

$$\eta_c = 100 - \text{Pertes fumées (en \%PCI)} \quad (II.16)$$

VII.2.3. Rendement global

Le rendement global est exprimé comme suit :

$$R = 100 - \frac{\text{pertes}}{\text{Energie introduite}} = 100 - \frac{\pi}{Q_{in}} \quad (\text{II.17})$$

Pertes globales : $\pi = Q_f + Q_p$

Puissance introduite : $Q_{in} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier numériquement le rendement de la chaudière et tracer leur cycle thermodynamique à l'aide du progiciel Thermoptim.

Le but de ce travail est de trouver les meilleurs paramètres (la pression, la température) pour obtenir un bon rendement de la chaudière.

Enfin, nous donnons une analyse des résultats basées sur chaque cycle puis une comparaison des résultats obtenus va nous permettre d'étudier quelque phénomène thermodynamique et de valider l'utilisation du progiciel utilisé.

II. Présentation du progiciel Thermoptim

Le progiciel Thermoptim est avant tout un environnement de modélisation systémique des technologies énergétiques très original et sans équivalent, qui rend possible l'adoption de nouvelles méthodes particulièrement fécondes en matière de pédagogie, de modélisation et d'optimisation. Le même outil est aujourd'hui mis en œuvre par une soixantaine d'utilisateurs pour deux grandes catégories d'applications :

- Soit pédagogiques
- Soit industrielles.

Il permet de représenter très facilement des systèmes énergétiques très variés (Fig.III-1), des plus simples aux plus complexes. Selon les cas, les modèles de ces composants peuvent être soit purement phénoménologiques, soit d'avantage technologiques, c'est-à-dire capables d'effectuer des dimensionnements ou de simuler le fonctionnement en régime non-nominal. Thermoptim se démarque d'autres logiciels orientés composants par l'accent qu'il met sur les couplages et interactions entre ces composants, c'est-à-dire sur les propriétés systémiques des installations étudiées. Il est ainsi complémentaire des outils spécialisés développés par les constructeurs pour la mise au point et la fabrication de leurs appareils.[18]

Déchargés des difficultés calculatoires habituelles en la matière, les élèves se motivent beaucoup plus pour la discipline et l'assimilent bien mieux.

Sur la base de l'expérience acquise ces dernières années, on peut regrouper en trois grandes catégories les démarches pédagogiques envisageables lorsqu'on dispose d'un outil comme Thermoptim :

- Les activités d'exploration guidées, dans lesquelles l'élève se contente de visualiser des modèles pré-assemblés dans un catalogue d'exemples,
- les activités d'assemblage de modèles à partir de composants prédéfinis, dans lesquelles il doit lui-même construire et paramétrer le système qu'il étudie,
- et enfin l'ajout de nouveaux composants à ceux du noyau existant, ce qui lui demande d'écrire par lui-même le modèle du composant (choix des paramètres caractéristiques, des variables de couplage et du jeu d'équations approprié, définition de l'interface graphique et implémentation informatique).

La première catégorie s'adresse à des débutants, surtout s'ils disposent de peu de temps et s'ils travaillent seuls, par exemple en suivant un module de formation en ligne. La seconde nécessite plus de temps, ainsi qu'un apprentissage plus poussé de Thermoptim, notamment de la part de l'encadrement, qui doit pouvoir corriger des erreurs de construction des modèles. La troisième enfin s'adresse à des élèves déjà familiers du progiciel et suffisamment confirmés en thermodynamique pour pouvoir commencer à concevoir des modèles de composants. Il faut de plus qu'ils aient un minimum de connaissances en programmation avec Java ou au moins C. Des interfaçages avec Fortran sont par ailleurs aussi possibles. [18]

III.2 Applications industrielles

De plus en plus, les technologies énergétiques se présentent comme des systèmes complexes interconnectés aux fonctions multiples, ces systèmes étant eux-mêmes très profondément intégrés et devant s'adapter à des cahiers des charges évolutives pendant leur durée de vie. Pour les étudier, il est souhaitable de pouvoir disposer d'environnements permettant de faciliter et de sécuriser leur modélisation ainsi que d'optimiser leur structure interne. Combinant approche systémique et démarche analytique et/ou empirique classique, Thermoptim offre un potentiel significatif dans ce contexte. Son environnement graphique permet de construire visuellement des modèles de nombreux systèmes énergétiques, des plus simples comme un réfrigérateur aux plus complexes comme des centrales électriques à cycle

combiné à gazéification de charbon intégrée mettant en jeu plusieurs centaines d'éléments. Au niveau industriel, ThermoOptim facilite et sécurise l'étude des systèmes énergétiques en simplifiant la démarche de modélisation et en la rendant plus sûre.

Comme application dans le domaine industrielle thermoOptim permet de :

- Faciliter et sécuriser la modélisation des systèmes énergétiques.
- Optimiser les systèmes énergétiques complexes grâce aux méthodes exégétiques. [18]

IV. Description de l'outil numérique

Il existe quatre environnements intégrés dans le logiciel qui sont :

- Editeur de schémas
- Simulateur avec moteur de recalcul
- Diagrammes thermodynamiques
- Méthode d'optimisation

Le principe de construction d'un système thermodynamique avec THERMOPTIM est très simple et se fait en deux étapes :

- On commence par en faire une description qualitative en le représentant graphiquement comme un ensemble de composants (plus généralement de fonctionnalités) connectés entre eux par des liens vectoriels représentant les canalisations de fluide ou les échangeurs de chaleur.
- On quantifie ensuite le modèle ainsi défini en paramétrant les différents types primitifs qu'il met en jeu, pour pouvoir en calculer les performances.

V. Description du cycle de la chaudière à vapeur étudié

On se propose d'étudier le cycle d'une chaudière à vapeur, et le représenter sur un diagramme entropique.

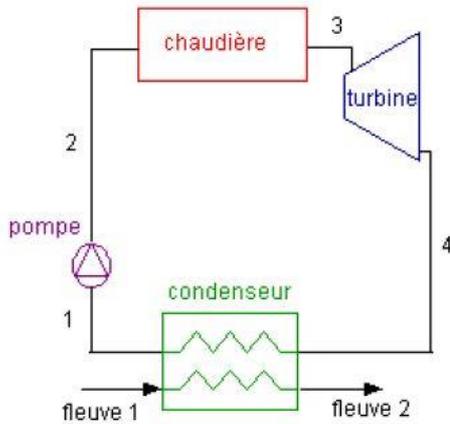


Figure III-2a: schéma d'une centrale à vapeur

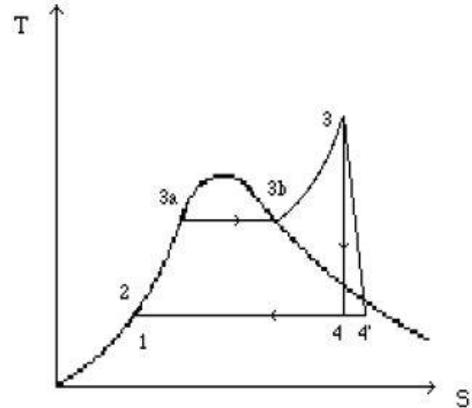


Figure III-2b: cycle de Hirn

Les éléments principaux d'une centrale à vapeur sont représentés sur la figure III-2a et comprennent :

- i. Au point 1, un débit de 1kg/s d'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 24.1°C , sous une faible pression (0,03). Une pompe, de rendement isentropique égal à 1, met cette eau en pression à 50 bars (point 2)
- ii. L'eau sous pression est ensuite chauffée à pression constante dans une chaudière à flamme (fuel charbon, gaz naturel). L'échauffement comporte trois étages :
 - Chauffage du liquide dans l'économiseur, de $24,29^{\circ}\text{C}$ à environ $263,91^{\circ}\text{C}$, température de début d'ébullition à 50 bars ; évolution (2-3a) sur le diagramme entropique
 - Vaporisation à température constante $263,91^{\circ}\text{C}$ dans le vaporiseur : évolution (3a-3b)
 - Surchauffe de $263,91^{\circ}\text{C}$ à 450°C dans la surchauffeur : évolution (3b-3)
- iii. La vapeur est ensuite détendue dans une turbine de rendement isentropique égale 0.85, jusqu'à la pression de 0.03bar évolution (3-4),
- iv. Le mélange liquide-vapeur est enfin condensé jusqu'à l'état liquide dans un condenseur, échangeur entre le cycle et la source froide.

V.1. Création du modèle

V.1.a. Composantes du cycle

Le cycle à modélisé est un cycle simple de production de vapeur, comprenant les éléments suivants :

- ✓ Une chaudière constituée d'un économiseur, un évaporateur et un surchauffeur.
- ✓ Un condenseur,
- ✓ Une turbine à vapeur,
- ✓ Une source chaude (gaz d'échappement)
- ✓ Une pompe de circulation.

Le schéma du cycle est représenté sur la figure III-3

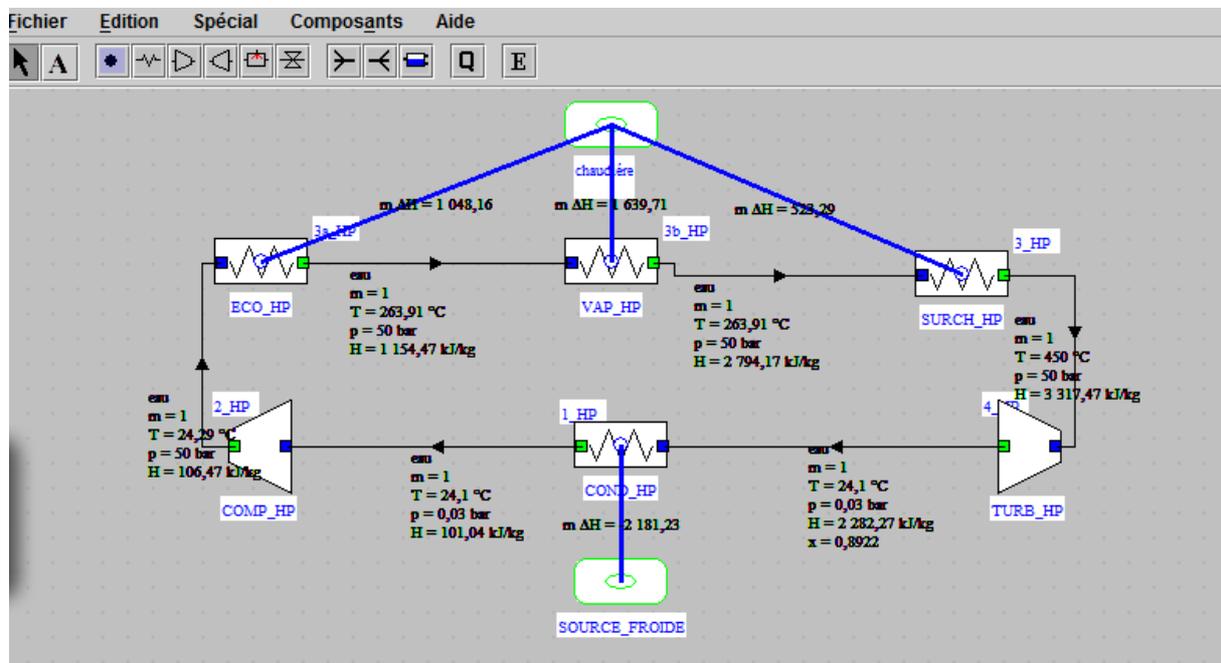


Figure III-3 : schéma du cycle vapeur étudié sur thermooptim

V.2. Création des éléments du simulateur

Après création du schéma du cycle étudié on ouvre l'interface schéma/simulateur (Figure III-4) pour transférer les informations sur le simulateur qui nous permettra de lancer le calcul.

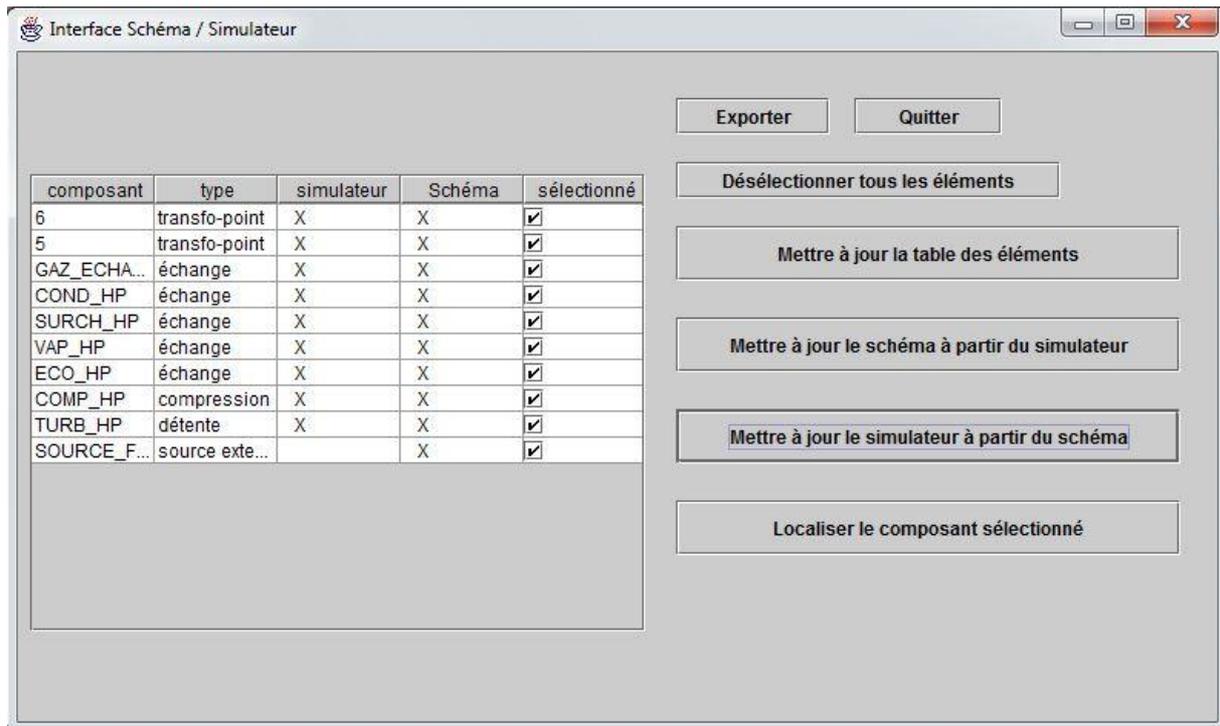


Figure III-4 : interface schéma-simulateur

Les informations transmises sont représentées sur la figure III-5

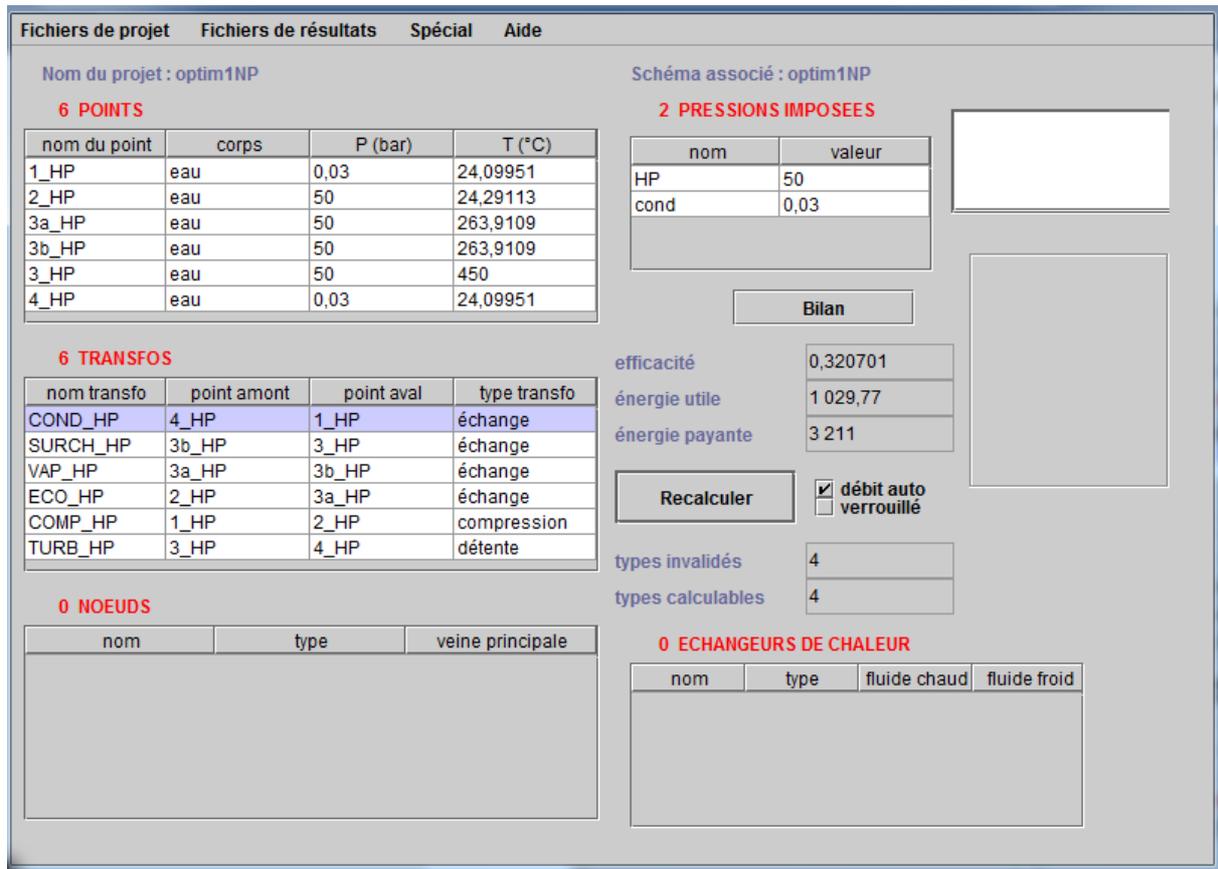


Figure III-5 : synoptique du simulateur

V.3. Paramètres de fonctionnement du cycle étudié

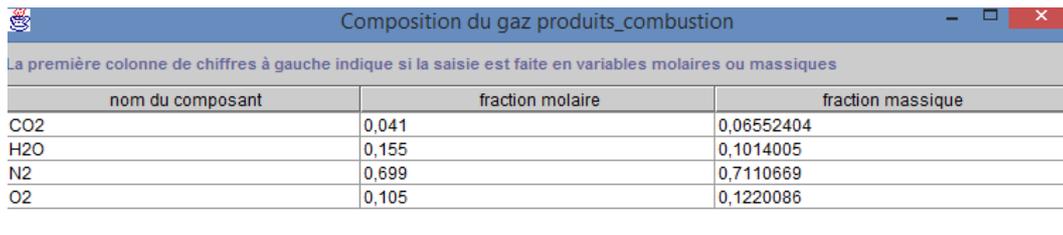
V.3.a. Pour la source chaude gaz échappement

$$T_{\text{entrée}} = 500 \text{ °C}, \quad T_{\text{sortie}} = 75 \text{ °C},$$

$$P_a = 1 \text{ bar}$$

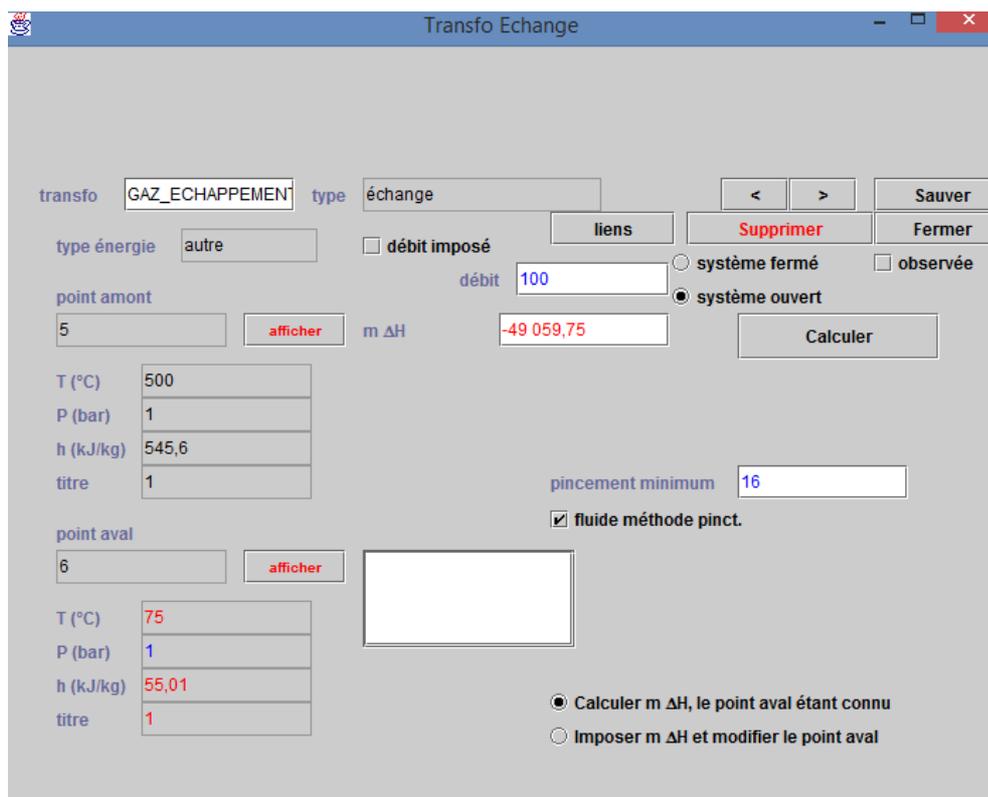
$$m_c = 100 \text{ Kg/s}$$

La figure III-6 illustre les paramètres de la source chaude à l'entrée et à la sortie inclus sur le logiciel.



nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,041	0,06552404
H2O	0,155	0,1014005
N2	0,699	0,7110669
O2	0,105	0,1220086

Figure III -6a : Constituants principaux du gaz de combustion



transfo: GAZ_ECHAPPEMEN type: échange

type énergie: autre

point amont: 5

T (°C): 500

P (bar): 1

h (kJ/kg): 545,6

titre: 1

point aval: 6

T (°C): 75

P (bar): 1

h (kJ/kg): 55,01

titre: 1

débit: 100

m ΔH: -49 059,75

calculer m ΔH, le point aval étant connu

Imposer m ΔH et modifier le point aval

calculer

Figure III-6b : paramétrage de la source chaude sur ThermoOptim

V.3.b Pour le cycle eau vapeur

Les éléments du cycle eau-vapeur tels que cités au paragraphe (VI-1) sont inclus sur Thermoptim comme montrés sur les Fig. III-7 au Fig. III-12

The screenshot shows the 'Transfo Echange' window in Thermoptim. The configuration is as follows:

- transfo:** ECO_HP
- type:** échange
- type énergie:** payante
- débit imposé:**
- débit:** 1
- point amont:** 2_HP
- m ΔH:** 12 565,29
- point aval:** 3a_HP
- T (°C) amont:** 24,25
- P (bar) amont:** 50
- h (kJ/kg) amont:** 106,31
- titre amont:** 0
- T (°C) aval:** 263,91
- P (bar) aval:** 50
- h (kJ/kg) aval:** 1 154,47
- titre aval:** 0
- pincement minimum:** 8
- fluide méthode pinct.:**
- Calculer m ΔH, le point aval étant connu:**
- Imposer m ΔH et modifier le point aval:**

Figure III -7 : paramétrage de l'élément économiseur

The screenshot shows the 'Transfo Echange' window in Thermoptim for an evaporator configuration. The configuration is as follows:

- transfo:** VAP_HP
- type:** échange
- type énergie:** payante
- débit imposé:**
- débit:** 1
- point amont:** 3a_HP
- m ΔH:** 19 656,82
- point aval:** 3b_HP
- T (°C) amont:** 263,91
- P (bar) amont:** 50
- h (kJ/kg) amont:** 1 154,47
- titre amont:** 0
- T (°C) aval:** 263,91
- P (bar) aval:** 50
- h (kJ/kg) aval:** 2 794,17
- titre aval:** 1
- pincement minimum:** 6
- fluide méthode pinct.:**
- Calculer m ΔH, le point aval étant connu:**
- Imposer m ΔH et modifier le point aval:**

Figure III -8 : paramétrage de l'élément évaporateur

transfo SURCH_HP type échange

type énergie payante débit imposé

point amont 3b_HP m ΔH 6 273,26

T (°C) 263,91
P (bar) 50
h (kJ/kg) 2 794,17
titre 1

point aval 3_HP

T (°C) 450
P (bar) 50
h (kJ/kg) 3 317,47
titre 1

débit 1

liens

Supprimer Fermer

○ système fermé observée
● système ouvert

Calculer

pincement minimum 16

fluide méthode pinct.

● Calculer m ΔH, le point aval étant connu
○ Imposer m ΔH et modifier le point aval

Figure III -9 : paramétrage de l'élément surchauffeur

transfo TURB_HP type détente

type énergie utile débit imposé

point amont 3_HP m ΔH -12 409,96

T (°C) 450
P (bar) 50
h (kJ/kg) 3 317,47
titre 1

point aval 4_HP

T (°C) 24,1
P (bar) 0,03
h (kJ/kg) 2 282,27
titre 0,89225

débit 1

liens

Supprimer Fermer

○ système fermé observée
● système ouvert

Calculer

● adiabatique ○ non adiabatique
● référence isentropique ○ référence polytropique

rend. isentropique 0,8
exposant polytropique 0

rapport de détente (>= 1) 1 666,67

● calculé ○ imposé

Imposer le rendement et calculer la transfo ●
Calculer le rendement, le point aval étant connu ○

mécaniquement équilibrée avec 0

Figure III -10 : Détente dans la turbine à vapeur

transfo: COND_HP type: échange

type énergie: autre débit imposé

point amont: 4_HP m ΔH: -26 148,59

T (°C): 24,1 P (bar): 0,03 h (kJ/kg): 2 282,27 titre: 0,89225

point aval: 1_HP

T (°C): 24,1 P (bar): 0,03 h (kJ/kg): 101,04 titre: 0

Calculer

système fermé observée

système ouvert

fluide méthode pinct.

Calculer m ΔH, le point aval étant connu

Imposer m ΔH et modifier le point aval

Figure III -11 : condensation de la vapeur après détente

transfo: COMP_HP type: compression

type énergie: utile débit imposé

point amont: 1_HP m ΔH: 63,18

T (°C): 24,1 P (bar): 0,03 h (kJ/kg): 101,04 titre: 0

point aval: 2_HP

T (°C): 24,25 P (bar): 50 h (kJ/kg): 106,31 titre: 0

Calculer

système fermé observée

système ouvert

adiabatique non adiabatique

référence isentropique référence polytropique

rend. isentropique: 0,95

exposant polytropique: 0

rapport de pression (>= 1): 1 666,67

calculé imposé

Imposer le rendement et calculer la transfo

Calculer le rendement, le point aval étant connu

Figure III -12 : recirculation de l'eau condensée par pompe

V.2. Amélioration du cycle avec resurchauffe

Pour améliorer le cycle de Hirn, on cherche à se rapprocher du cycle de Carnot en effectuant des resurchauffes. Dans ce cas, on commence par détendre partiellement la vapeur, puis on la refait passer dans la chaudière, ou elle est réchauffée à la nouvelle pression, jusqu'à la température maximale du cycle (Figure III-13). Cette opération peut

le cas échéant être répétée plusieurs fois, ce qui permet d'approcher un para isotherme, et donc d'augmenter le niveau moyen de la température du cycle coté source chaude.

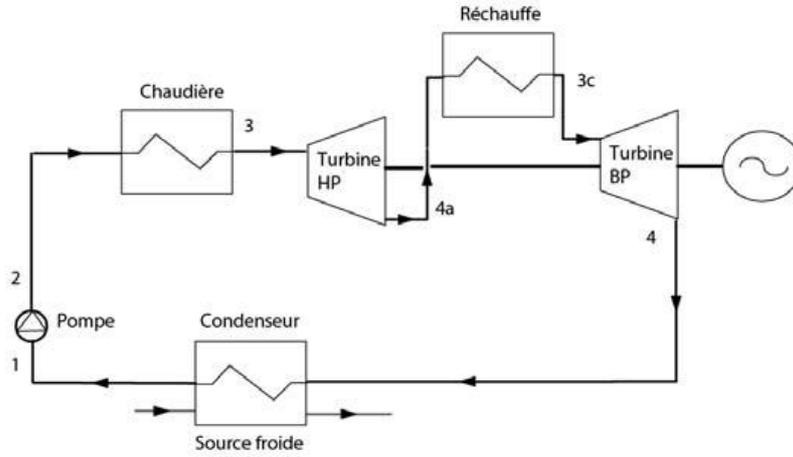


Figure III -13 : cycle avec resurchauffe de la vapeur

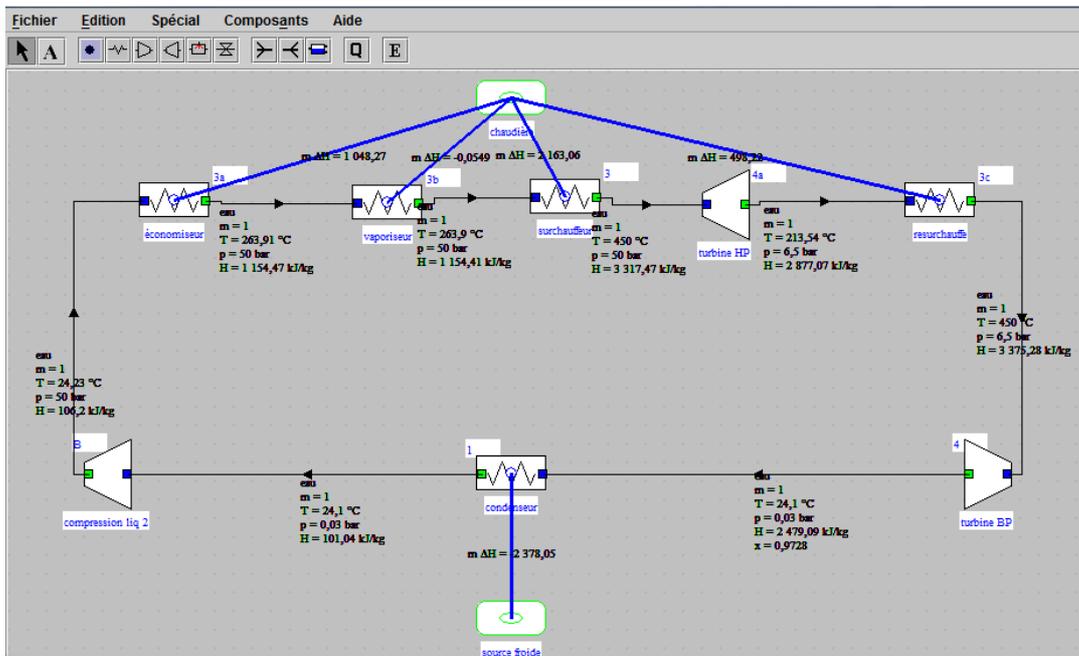


Figure III -14 : Schéma du cycle avec resurchauffe de la vapeur

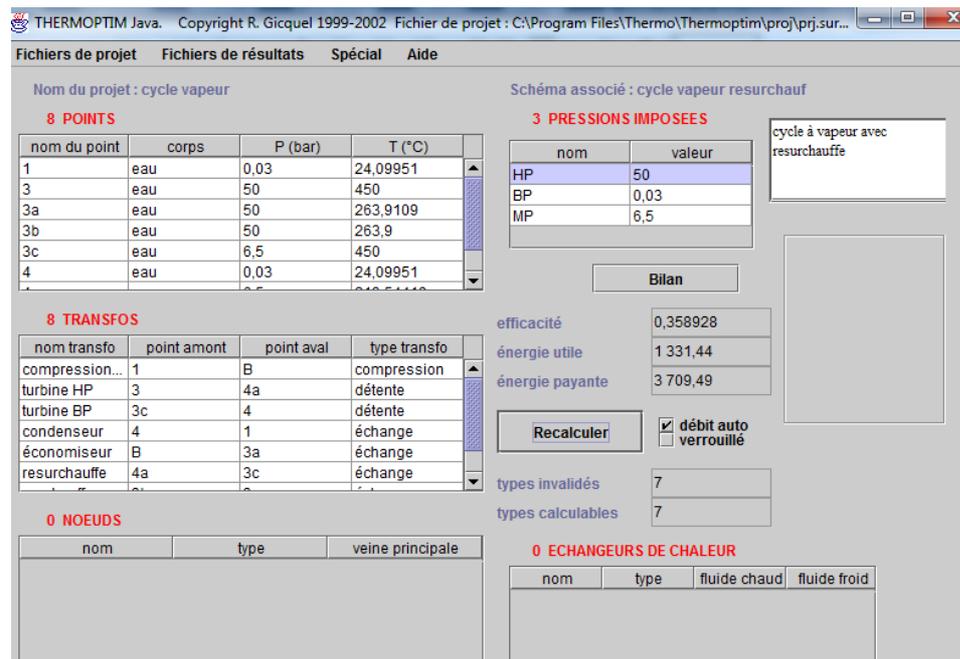


Figure III -15 : paramétrage du cycle avec resurchauffe de la vapeur sur simulateur

i. Cycle à resurchauffe et prélèvement :

Considérons un cycle avec une resurchauffe (Figure III-13). Si l'on prélève un peu de vapeur en sortie de la première détente, au point 4a sur la Figure III-16, sa pression reste suffisamment élevée pour qu'on puisse la condenser à une température permettant de préchauffer l'eau sous pression sortant de la pompe au point 2.

L'enthalpie de la vapeur étant très largement supérieure à celle du liquide, du fait de la chaleur latente de vaporisation, on conçoit qu'il est possible d'assurer le préchauffage du liquide grâce à un faible prélèvement de vapeur en cours de détente.

Ce cycle s'appelle cycle à resurchauffe et prélèvement ou encore à soutirage. Bien entendu, pour que l'opération soit possible, il faut que la vapeur prélevée soit à une température supérieure à celle du liquide, ce qui fait qu'en pratique, on se contente d'un réchauffage partiel.

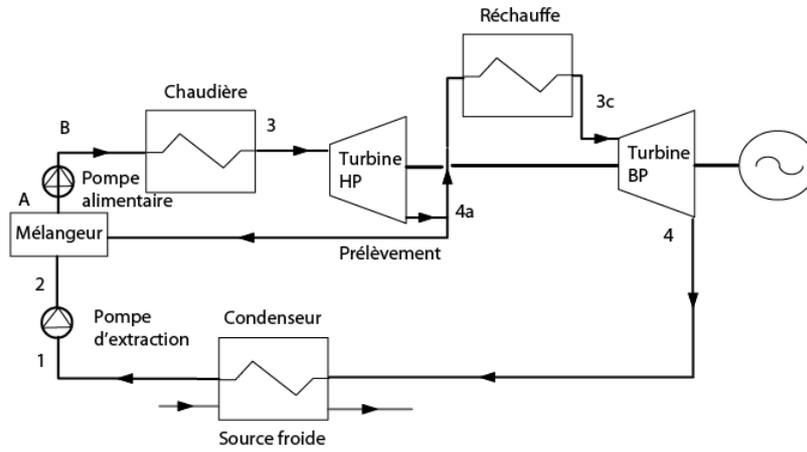


Figure III -16 : cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur

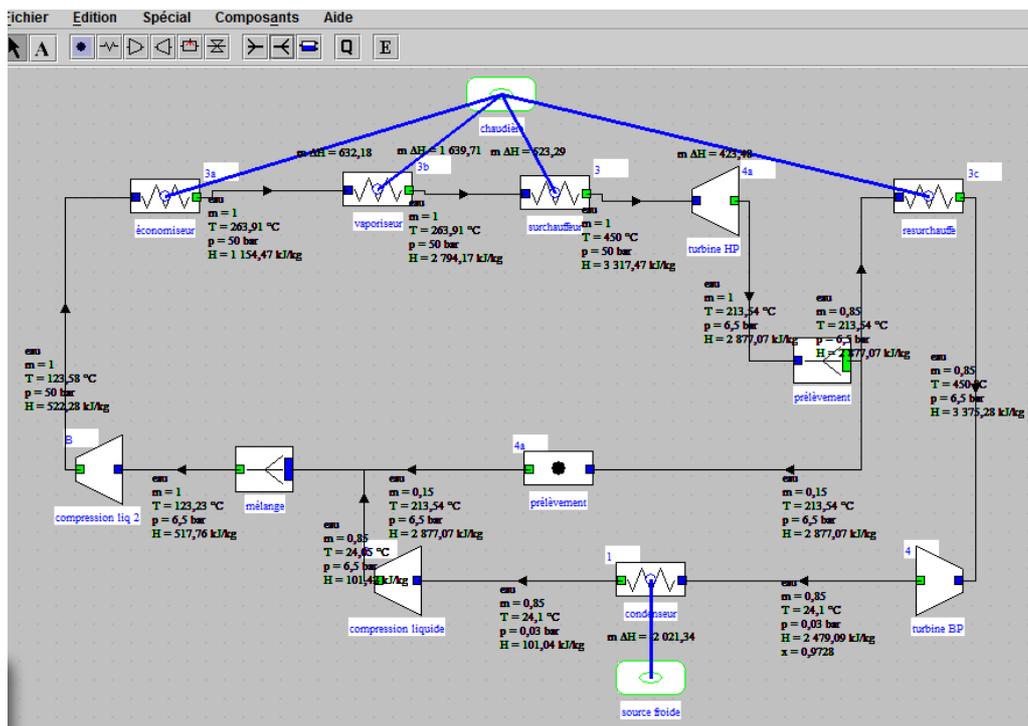


Figure III -17 : Schéma du cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur

THERMOPTIM Java. Copyright R. Gicquel 1999-2002 Fichier de projet : C:\Program Files\Thermo\Thermoptim\proj\prelev...

Fichiers de projet Fichiers de résultats Spécial Aide

Nom du projet : cycle vapeur Schéma associé : cycle vapeur avec prélèvement

10 POINTS

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
1	eau	0,03	24,09951
2	eau	6,5	24,04547
3	eau	50	450
3a	eau	50	263,9109
3b	eau	50	263,9109
3c	eau	6,5	450

3 PRESSIONS IMPOSEES

nom	valeur
HP	50
BP	0,03
MP	6,5

cycle à vapeur avec resurchauffe et prélèvement

10 TRANSFOS

nom transfo	point amont	point aval	type transfo
compression...	A	B	compression
compression...	1	2	compression
turbine HP	3	4a	détente
turbine BP	3c	4	détente
condenseur	4	1	échange
économiseur	B	3a	échange

2 NOEUDS

nom	type	veine principale
prélèvement	diviseur	turbine HP
mélange	mélangeur	compression liq 2

0 ECHANGEURS DE CHALEUR

nom	type	fluide chaud	fluide froid
-----	------	--------------	--------------

Bilan

efficacité 0,371995
 énergie utile 1 197,33
 énergie payante 3 218,67

Recalculer débit auto verrouillé verrouillé

types invalidés 15
 types calculables 14

Figure III -18 : paramétrage du cycle avec resurchauffe et prélèvement de la vapeur sur simulateur

VI. Résultats et interprétations

Pour des différents taux de compression de la pompe de circulation d'eau circulant dans l'économiseur, nous maintenons une pression d'entrée $P_e = 0.03$ bar et on varie la pression de sortie P_s , nous calculons le rendement de notre cycle puis on trace les cycles thermodynamiques du système traduit par le taux de l'énergie payante sur l'énergie utile.

D'après le courbe tracé sur la Figure.III-19 démontrant l'évolution de l'efficacité du cycle avec le taux de compression de l'eau à l'entrée de l'économiseur, nous constatons clairement que l'efficacité du cycle évolue avec l'augmentation de la pression de l'eau à l'entrée de l'économiseur ce qui représente un gain d'énergie important allant jusqu'à 33,85 % pour une pression d'entrée 100 bars.

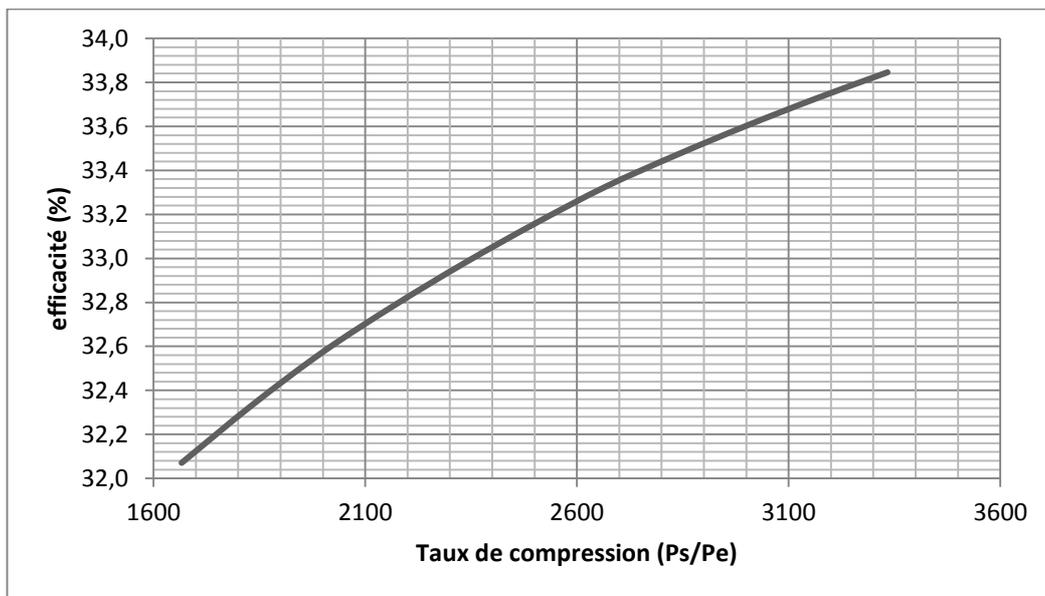


Figure III-19 : Evolution de l'efficacité du cycle avec le taux de compression de l'eau à l'entrée de l'économiseur

Dans le but de déterminer l'influence de quelques paramètres sur l'amélioration de notre cycle étudié nous avons tracé le cycle entropique pour trois niveaux de pressions d'entrée de la pompe de circulation en gardant la pression de sortie à 50 bars, puis nous avons tracé le même cycle entropique mais pour des pressions de sortie variables avec $P_e = 0.03$ bars.

La Figure III-20, nous montre le cycle de Rankine de notre système défini par les points suivants :

2-3a : Echauffement de l'eau à pression constante de 24 °C à 264 °C dans l'économiseur.

3a-3b : Vaporisation de l'eau sortant de l'économiseur à pression constante $P_s = 50$ bars dans L'évaporateur.

3b-3 : Réchauffage de la vapeur produite de 264°C à 450°C à pression constante.

3-4 : Détente isentropique de la vapeur saturante dans la turbine à vapeur de 50 bars à 0.03 bars.

4-1 : condensation totale de la vapeur après détente à pression constante 0.03 bars

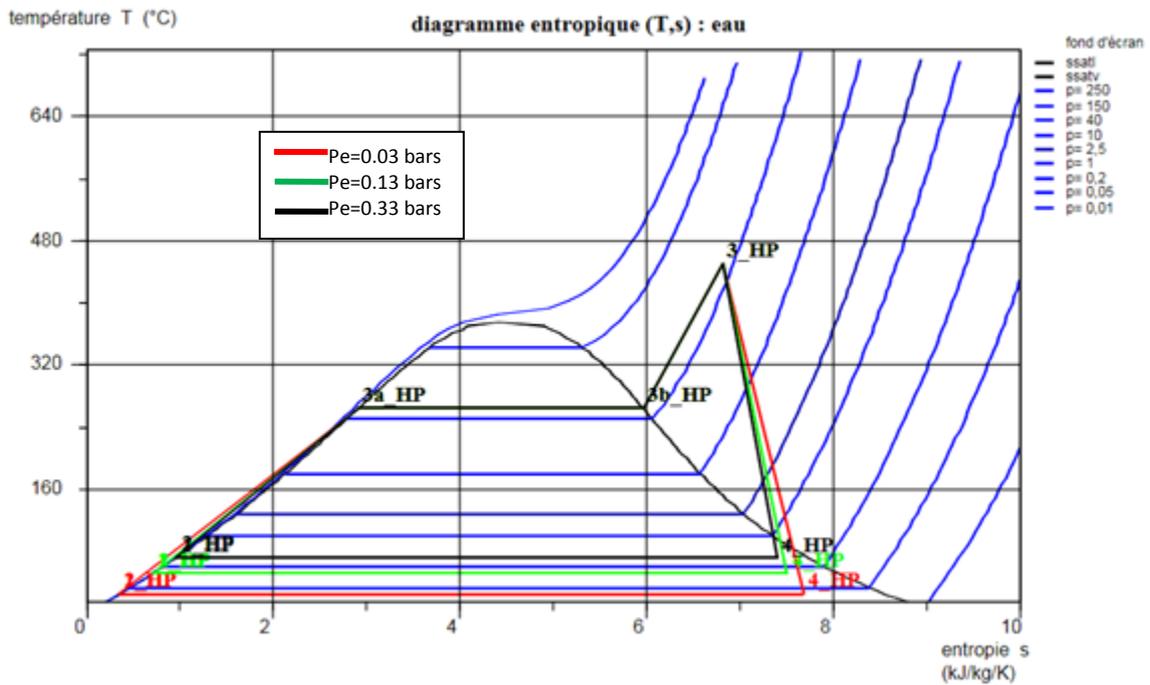


Figure III-20 : Diagramme entropique du cycle étudié à différentes pressions d'entrée d'eau

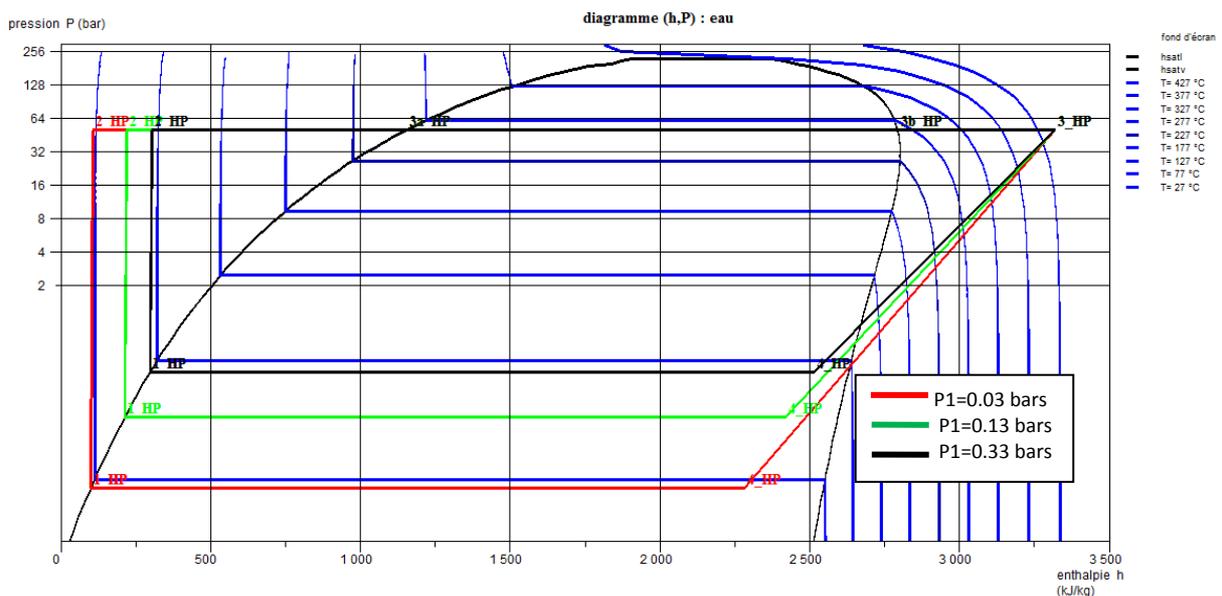


Figure III-21 : Diagramme enthalpique du cycle étudié à différentes pressions de sortie d'eau

Sur le même diagramme, nous observons qu'une légère diminution de la pression à l'entrée de la pompe de circulation engendre une diminution de la température de l'eau condensé (4-1) et sans influence significative sur les autres composantes du cycle plus précisément la partie de la chaudière.

Le diagramme de Rankine pour un cycle d'eau-vapeur pour trois valeurs de pression d'eau circulant dans l'économiseur est représenté sur la Figure III-22, nous remarquons clairement que la variation de pression provoque un changement sur trois phase du cycle à savoir les points (3a-3b), (3b-3) et (3-4). L'augmentation de la pression P_s engendre un échauffement de la vapeur avec un taux de 17 % en phase de vaporisation et une diminution de l'entropie sur les deux phases de surchauffe et détente.

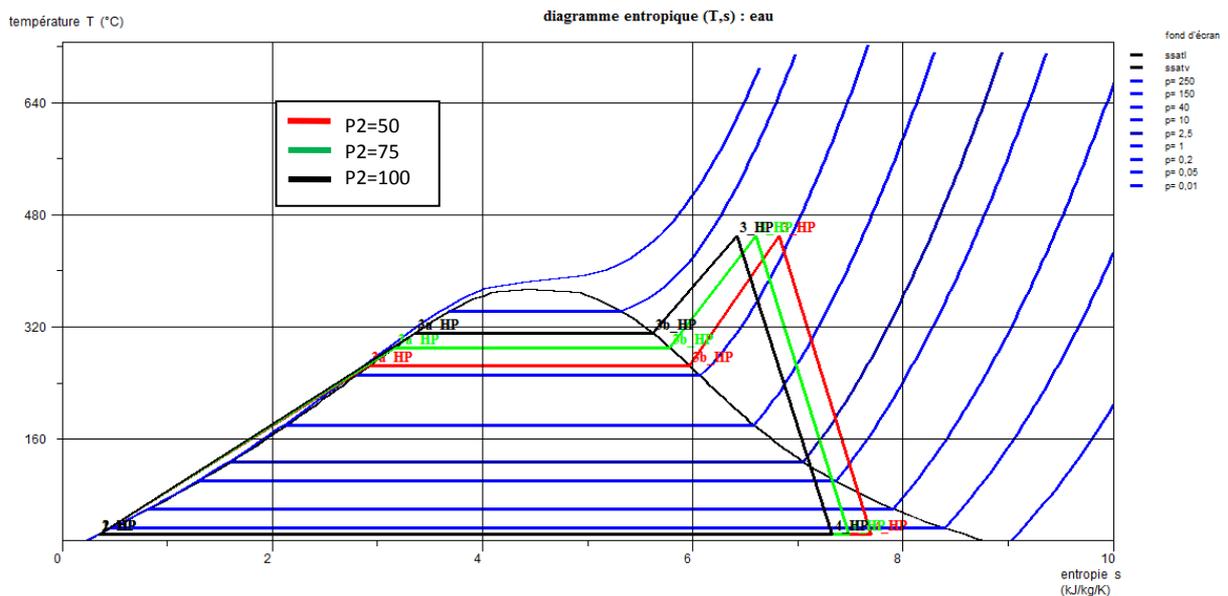


Figure III-22 : Diagramme entropique du cycle étudié à différentes pressions de sortie d'eau

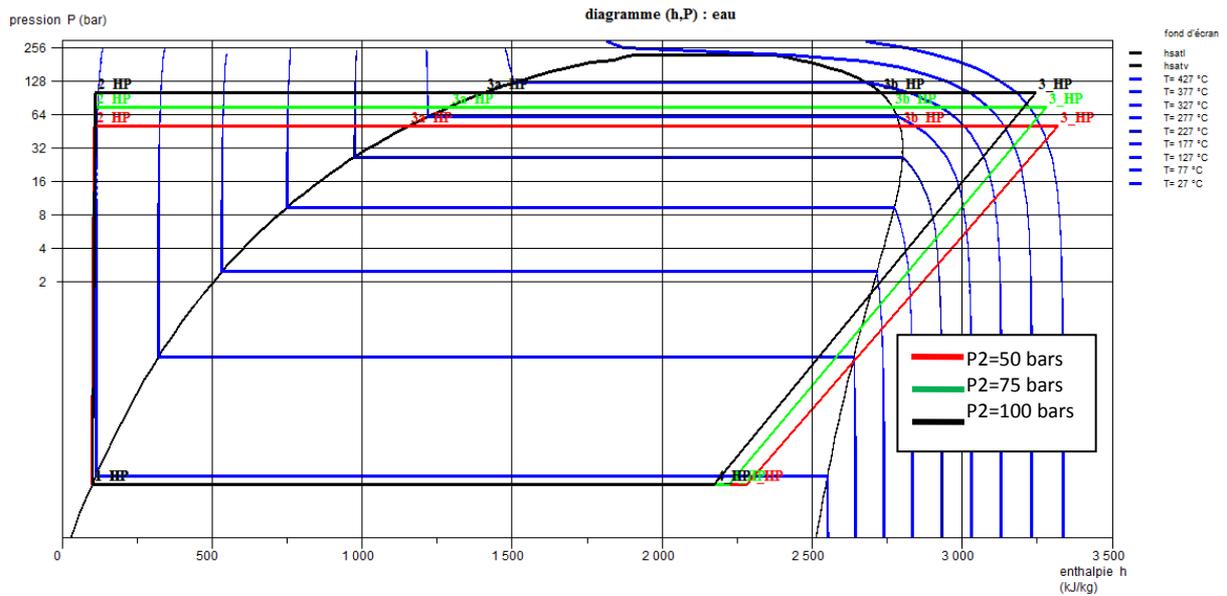


Figure III-23 : diagramme enthalpique du cycle simple

VI.2. Amélioration du cycle avec resurchauffe

Après création de cycle avec resurchauffer et l'utilisation de moteur de calcul on a une augmentation de 11% dans le rendement par rapport le cycle simple (cycle simple=32.07%, cycle avec resurchauffe=35.8%).

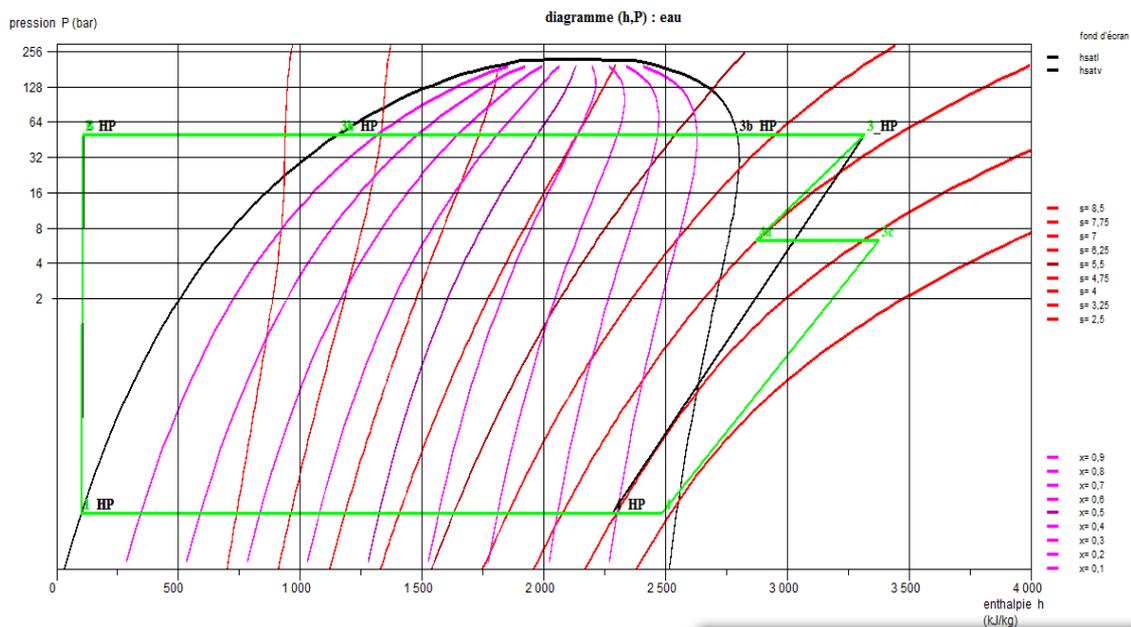


Figure III-24 : diagramme enthalpique du cycle avec resurchauffe

Il en résulte une augmentation de la puissance et des gains de rendement de quelques pourcents. La Figure III-24 montre le tracé du cycle dans le diagramme (h, P). On y a superposé le nouveau cycle en vert et le cycle simple en noir.

On peut observer une nette augmentation du titre en fin de détente, ce qui est toujours intéressant pour prolonger la durée de vie des aubages de turbine.

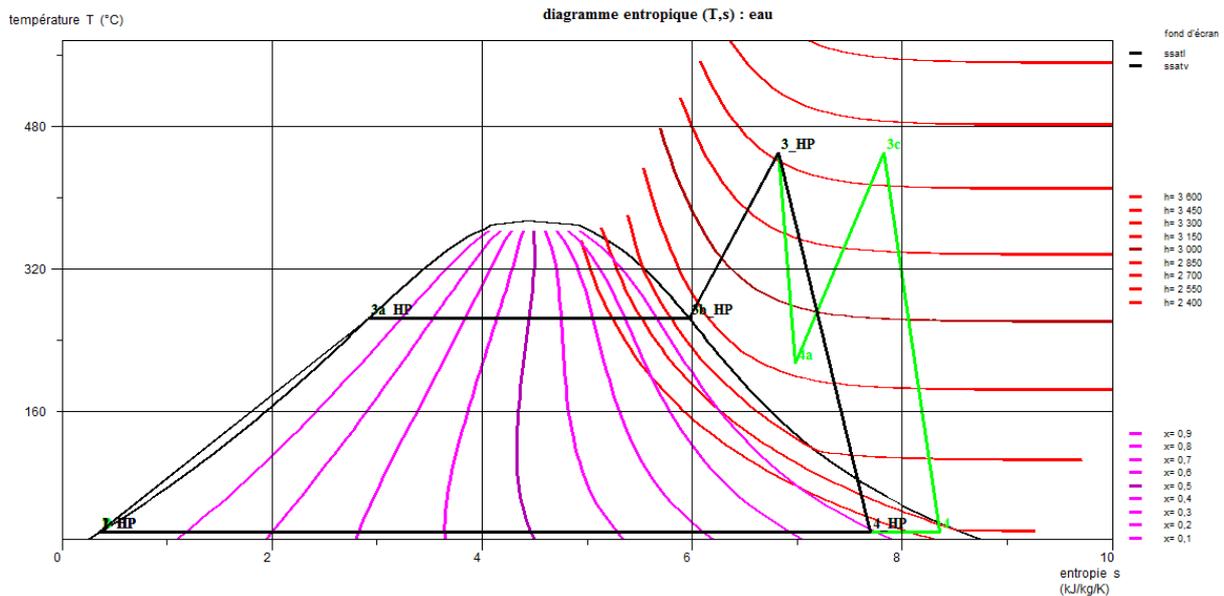


Figure III-25 : diagramme entropique du cycle avec resurchauffe

VI.3. Amélioration du cycle avec resurchauffe et prélèvement

Après création de cycle avec resurchauffer avec prélèvement et l'utilisation de moteur de calcul on remarque une augmentation de 16% dans le rendement par apport au cycle simple (cycle simple=32.07%, cycle avec resurchauffe=37.1%).

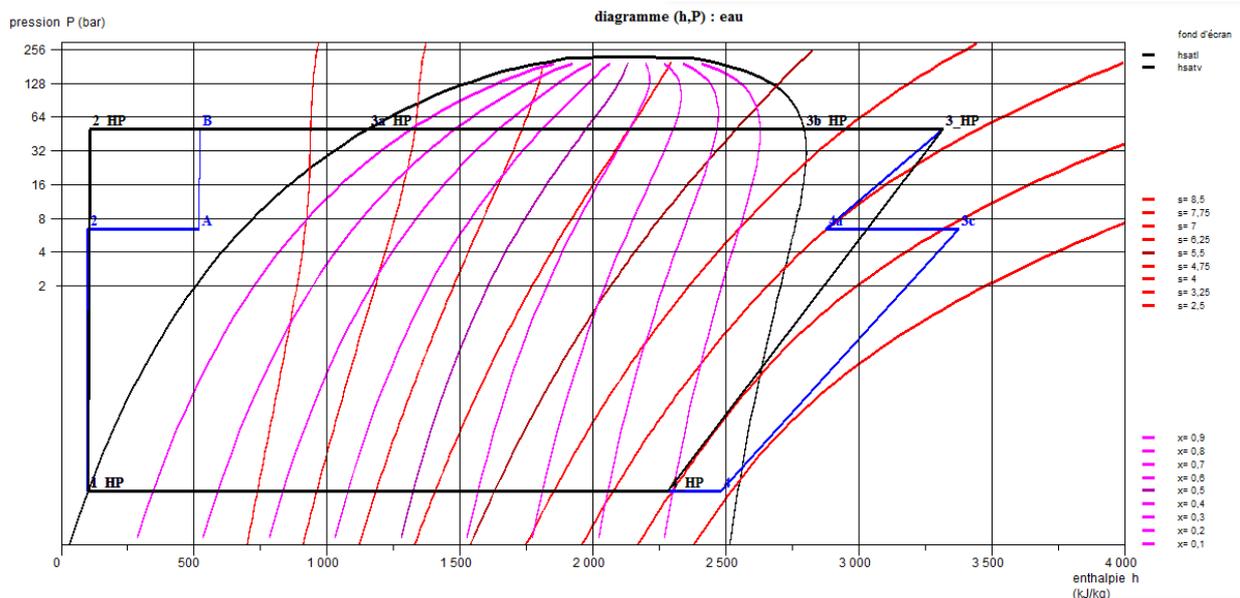


Figure III-26 : diagramme enthalpique du cycle avec resurchauffe et prélèvement

Ainsi nous constatons que lorsqu'il y a prélèvement, le débit de fluide qui évolue n'est pas le même dans l'ensemble de la machine. Si on prélève une fraction ε de vapeur, et pour un débit masse unitaire, le débit qui transite entre les points 4a, 3c, 4, 1 et 2 est égal à $(1 - \varepsilon)$, et celui qui évolue entre les points A, 3a, 3b, 3 et 4a est égal à 1. Le débit dans la turbine BP étant plus faible que dans le cycle à resurchauffe, la puissance de l'installation diminue. Le gain sur le rendement est significatif : globalement, les prélèvements peuvent contribuer à une amélioration de près de cinq points du rendement interne du cycle de Hirn. Combinés avec les resurchauffes, le gain est d'environ 7 points, soit un rendement supérieur de 20 % à celui du cycle initial.

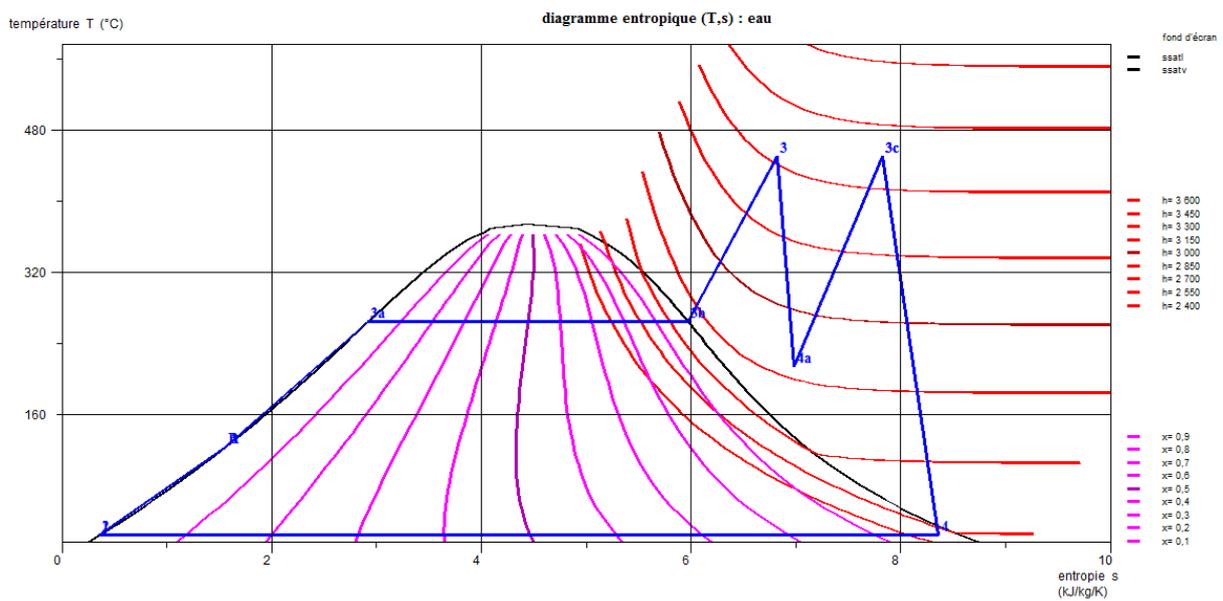


Figure III-27 : Diagramme entropique du cycle avec resurchauffe et prélèvement

Conclusion Générale

Cette étude est réalisée pour l'obtention du diplôme de Master en énergétique. Notre objectif principal est de bien comprendre le fonctionnement du cycle à vapeur comportant essentiellement la chaudière industrielle. Ainsi, nous nous sommes proposé d'entreprendre une analyse pour la performance du cycle eau-vapeur dans le but d'améliorer le rendement du système.

Le premier chapitre nous a permis de présenter des généralités sur les chaudières industrielles : leurs composantes, leur classification, leurs types et leurs différentes catégories.

Le deuxième chapitre est consacré à différents cycle thermodynamique des turbines à vapeur, On a rappelé aussi le principe de fonctionnement d'un moteur à vapeur, et les domaines d'utilisation. En fin, nous avons présenté les bilans thermodynamiques permettant le calcul du rendement.

Dans le troisième chapitre nous avons modélisé et simulé un cycle simple de vapeur, puis nous avons utilisé deux techniques pour améliorer le rendement à savoir le système avec resurchauffe de la vapeur et le deuxième système basé sur le soutirage.

Le résultat de cette étude a permis de conclure que la performance d'un cycle eau-vapeur basé sur le resurchauffe et prélèvement de la vapeur améliore le rendement thermique d'un taux de 16 % par rapport au cycle simple.

- [1] Document chaudière à vapeur (Wikipédia)
- [2] Alain RIOU Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et Aérotechnique
Chef de Projets dans la Division Chaudières Industrielles de la Société Babcock Entreprise
- [3] Stage pratique au niveau de la société ENCC (chaudrale)
- [4] Documentation interne de la société de construction d'équipement chaudronnés (chaudral-SPA relizane)
- [5] Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master KASS Mohamed et BELAHCENE Belahouel au Centre Universitaire de Ain Témouchent BELHADJ Bouchaib (2014/2015)
- [6] Rapport de projet de fin d'étude marocain « présentation de la Samir » (2005/2006)
- [7] Document préparé et animé par : M. Hamadi ANIBA, Expert consultant Pour une formation spécialisée organisée par le CETIME à l'intention
- [8] Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master BAHOUS AZZEDDINE et SMAHI ISMAIL au Centre Universitaire de Ain Témouchent BELHADJ Bouchaib (2016/2017)
- [9] Thermodynamique classique de la vapeur « Wikipédia »
- [10] Document « cycle des machines à vapeur » A. TAIEB ET Y. BEN SALEM
- [11] W. J. M. Rankine, *A Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers*: Richard Griffin & Company, 1859.
- [12] S. Klein and G. Nellis, *Thermodynamics*: Cambridge University Press, 2011
- [13] M. Feidt, *Energétique : Concepts et applications Cours et exercices corrigés* : Dunod, 2006.
- [14] G.-A. Hirn, "Mémoire sur la théorie de la surchauffe dans les machines à vapeur," *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, vol. 28, pp. 5-106, 1857.
- [15] M. A. B. Yunus A. Cengel. (2006). *Thermodynamics an engineering approach (fifth ed.)*.
- [16] Mémoire présentée à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie par ANTHONY GONCALVES « développement d'un système de combustion pour les résidus forestiers » HIVER 2010
- [18] Le site officiel du programme thermooptim
http://direns.minesparistech.fr/Sites/Thopt/fr/co/presentation-thermooptim_1.html

