

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Département Génie Chimique

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
Génie Chimique

Thème :

# Analyse thermo économique d'une installation de cogénération

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup>: BENNOUR Hocine

M<sup>r</sup>: T.AHMED ZAID

Présenté par :

M<sup>lle</sup>: HAMDI Amel

M<sup>lle</sup>: RAHAL Narimane

Soutenu le 14 Juin 2015 devant le jury composé de :

**Présidente :** M<sup>me</sup> : R . DERRICHE Professeur à l'ENP

**Examineurs :** M<sup>me</sup> : F. MEZIANI M. A. A à l'ENP

M<sup>r</sup> : R .BOUARAB Professeur à l'ENP

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi 16200 Alger

**Promotion 2015**

# Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements à nos encadreurs Monsieur Bennour Hocine et Monsieur Toudert Ahmed Zaid, pour leur soutien constant, leurs précieux conseils et leur disponibilité exceptionnelle tout au long de cette recherche.

Grâce à leur accompagnement et leur souci du détail, la préparation de ce mémoire a été pour nous une véritable ouverture vers le monde professionnel .

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à l'ensemble des membres du corps professoral du département de génie chimique pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis ainsi que pour leur disponibilité et leur dévouement au cours de ces trois dernières années.

Nos remerciements s'adressent enfin aux membres du jury nous font l'honneur de participer à notre soutenance.

Nous remercions sincèrement la Présidente Madame Derriche ,Madame Meziani ,Monsieur Bouarab d'avoir accepté d'évaluer nos travaux en qualité d'examineurs.

Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail et qui ont su nous soutenir durant sa préparation, trouvent ici l'expression de nos plus chaleureux remerciements.

# Dédicaces

A mes parents, en témoignage de ma reconnaissance et mon amour, eux qui m'ont apporté de si précieux conseils, encourager et soutenu et fait de moi ce que je suis.

A mon grand frère Razine pour avoir toujours cru en moi et pousser vers le haut.

À ma Mima et mon tonton Mani que dieu leur prête longue vie.

A ma binôme Amel pour avoir été présente tout le long de cette aventure.

A tous mes camarades de promotion avec lesquels j'ai vécu des moments riches en émotions au cours de ces trois dernières années, particulièrement Sadia, Roza, Ilhem Neila et Naila.

Aux membres du club d'activités polyvalentes qui a rythmé mes années à l'Ecole Nationale Polytechnique, plus particulièrement l'équipe du projet TEDxENP 2015.

A mes amis de toujours Feriel, Sabrina, Nabila et Karim

À la mémoire de mon grand-père et de ma grand-mère qu'ils reposent en paix.

Je dédie ce mémoire

**Narimane**

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes Parents.

A la mémoire de mon oncle Khaled qu'il repose en paix.

A mon frère Mustapha.

A mes soeurs Yasmine et Ikrame.

A ma binôme Narimane.

A mes amies : Besma, Amina, Kami, Sabah, Samira, Selma, Sarah, Roza et  
Sadia

A mes amis de l'ENP et pour les cinq ans qu'on a passé ensemble.

A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie en  
particulier à Ilyes.

Le jour est venu pour leur dire **Merci...**

**Amel**

## ملخص :

في هذه الدراسة تم طلب إجراء تحليل اقتصادي حراري لمحطة التوليد المشترك للطاقة تعمل بوقود الكتلة الحيوية لتلبية احتياجات عملية ما و ذلك بانتاج حراري يبلغ 56 طن في الساعة من البخار المسخن عند درجة حرارة 120 م° وتحت ضغط 1 بار وانتاج كهربائي يبلغ 3 ميغا واط . الكفاءة الطاقوية لكل عنصر من عناصر المركب و المركب بأكمله تم تحديدها عن طريق تحليل طاقي. تم عرض طريقة التحليل الاقتصادي الحراري و المعادلة التي تربط ثمن المواد الأولية بثمن عناصر المركب و الوقود. و لكن نظرا للصعوبات المواجهة لتحديد ثمن الوقود و المعدات و ايضا لتعقيد العوامل التي تعتمد عليها بقيت تكاليف المنتج مشفرة .

**الكلمات الرئيسية :** التوليد المشترك للطاقة, الكتلة الحيوية, الجزء المستعمل من الطاقة, تحليل اقتصادي حراري.

## Résumé :

Dans cette étude il nous a été demandé d'effectuer une analyse thermo économique d'une installation de cogénération alimenté par un combustible biomasse devant fournir à un procédé avec une puissance électrique de 3MW et une puissance thermique de 56t/h de vapeur surchauffée à 1bar et 120°C. Les performances énergétiques et exégétiques des différents composants de l'installation et de l'installation dans son ensemble ont été établies par analyse énergétique et exergetique. La méthode de l'analyse thermo économique a été exposée et l'équation liant les coûts des produits aux coûts globaux des équipements et des combustibles a été établie. La difficulté rencontrée pour former les coûts des combustibles et des équipements étant donné la complexité des facteurs dont ils dépendent, a fait que le coût chiffré des produits n'a pas pu être obtenu.

**Mots clés :** Cogénération – biomasse -exergie -analyse thermo économique.

## Abstract:

In this study it was asked to perform a thermo economic analysis of a Combined Heat and Power (CHP) plant powered by biomass fuel to provide a process with an electrical output of 3 MWe and a thermal capacity of 56 t / h of superheated steam at 1 bar and 120 ° C. The energetic and exegetic performance of different system components, and installation as a whole were determined by energy and exergy analysis. The method of thermal economic analysis was exposed and the equation linking product costs to the overall costs of equipment and fuels has been established. The difficulty to evaluate fuel costs and equipment given the complexity of the factors on which they depend, prevented us from obtaining the encrypted product costs.

**Key words:** Combined Heat and Power–biomass-exergy-thermoeconomic analysis.

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>v</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b> : .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Introduction à la cogénération</b> .....	<b>3</b>
I. Introduction :.....	3
II. Etude comparative entre la génération séparée et la cogénération : .....	4
III. Les différentes classes de systèmes de cogénération : .....	5
<b>III.1. Les systèmes à couplage chaleur-force</b> : .....	5
III.2. Les systèmes à couplage force-chaleur : .....	6
III.3. Les systèmes à impératif économique : .....	7
IV. Intérêts de la cogénération : .....	7
V. Limites de la cogénération : .....	8
VI. Pourquoi la cogénération ? [2] ;[3] ;[4].....	8
VII. Qui peut utiliser la cogénération ? .....	9
VIII. Equipements et technologies .....	10
VIII.1. Types d'utilisation de la turbine à gaz en cogénération .....	11
La turbine à gaz avec récupération de chaleur .....	11
Turbine a gaz dans un cycle "CHENG" ou "STIG" .....	12
Les microturbines: .....	12
VIII.2. Types de turbines à vapeur utilisés en cogénération : .....	14
Turbine à contre pression.....	14
Turbine à condensation et extraction : .....	15
IX. Conclusion : .....	16
<b>Chapitre II : Description de l'installation</b> .....	<b>17</b>
I. Introduction :.....	17
II. Description de l'installation :.....	17
III. Présentation des données nécessaires aux calculs énergétiques et exergetiques .....	20
III. 1. Données concernant le circuit eau-vapeur : .....	20
III.2. Données concernant l'air et les fumées. ....	20
IV. Conclusion : .....	22

# Table des matières

<b>Chapitre II :</b> .....	<b>23</b>
<b>Analyse énergétique</b> .....	<b>23</b>
I. Introduction :.....	23
II. Rappel de l'expression du bilan d'énergie pour un système ouvert en régime permanent .....	23
III. Schéma de l'installation :.....	25
IV. Bilans d'énergie pour les différents systèmes de l'installation :.....	26
V. Bilan d'énergie de la chaudière .....	29
VI. Résultats de l'analyse énergétique:.....	31
VI.1. Détermination de la puissance du ventilateur : .....	31
VI.2. Détermination des enthalpies des fluides aux points de transition entre les différents composants:.....	32
VI.3. Résultats des calculs des bilans d'énergie : .....	35
<b>Chaleur totale perdue dans l'installation :</b> .....	<b>35</b>
VI.4. Rendements de la cogénération : .....	35
VII. Exploitation des résultats : .....	36
<b>Chapitre III :</b> .....	<b>41</b>
<b>Analyse exergo-économique</b> .....	<b>41</b>
I. Introduction :.....	41
II. Définition de l'exergie : .....	41
III. Exergie d'un écoulement de fluide : .....	42
III.1.1. Exergie physique de la vapeur d'eau .....	42
III.1.2. Exergie physique des fumées.....	43
III.2. Exergie chimique :.....	45
III.2.1. Exergie chimique de l'air et des fumées : .....	47
III.2.2. Exergie chimique standard d'un combustible.....	48
IV. Bilan d'exergie pour un volume de contrôle :.....	51
V. Exergie détruite dans chaque système :.....	52
VI. Exploitation des résultats de l'analyse exergetique :.....	55
VII. Analyse thermo économique.....	59
VII.1. Introduction.....	59
VIII. Conclusion : .....	62
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>63</b>
<b>Références bibliographiques :</b> .....	<b>65</b>

# Liste des tableaux

<b>Tableau I-1:</b> Différentes gamme de cogénération .....	4
<b>Tableau I-2:</b> Les différentes voies de la valorisation énergétique de la biomasse .....	11
<b>Tableau I-3:</b> Comparaison entre les trois types de cycles à turbine à gaz .....	14
<b>Tableau II-1:</b> Données relatives à l'eau et à la vapeur d'eau .....	20
<b>Tableau II-2:</b> Données concernant le combustible, l'air et les fumées .....	21
<b>Tableau II-3:</b> Composition massique élémentaire des combustibles déchets et bois .....	21
<b>Tableau II-4:</b> Composition des fumées issues de la combustion d'un bois brut à 20% d'humidité et un déchet brut à 23.05% d'humidité. ....	22
<b>Tableau III-1:</b> Bilans d'énergie et rendements énergétiques des différents volumes de contrôle de l'installation .....	26
<b>Tableau III-2:</b> Puissance du ventilateur suivant le type de combustible .....	32
<b>Tableau III-3:</b> Données intervenant dans les bilans d'énergie .....	34
<b>Tableau III-4:</b> Résultats des bilans d'énergie.....	35
<b>Tableau III-5:</b> Rendements énergétiques des différents systèmes .....	35
<b>Tableau III-6:</b> Rendements de la cogénération.....	36
<b>Tableau IV-1 :</b> Environnement de référence pour les calculs exergétiques.....	42
<b>Tableau IV-2 :</b> Le flux d'exergie en différents points .....	43
<b>Tableau IV-3 :</b> Valeurs lues pour les différentes enthalpies et entropies des constituants des fumées aux températures $T_{f1}$ et $T_{f2}$ .....	45
<b>Tableau IV-4 :</b> Exergie chimique standard de différentes espèces à l'état pur .....	47
<b>Tableau IV-5 :</b> Données relatives aux bois et aux déchets nécessaires pour le calcul de l'exergie chimique de l'air et des fumées dans les deux cas considérés. ....	48
<b>Tableau IV-6:</b> Données nécessaires au calcul de l'exergie chimique des combustibles .....	50

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau IV-7:</b> Exergie du combustible, de l'air de combustion et des fumées issues des deux combustions.....	51
<b>Tableau IV-8 :</b> Résultats des différents bilans d'exergie .....	55
<b>Tableau IV-9:</b> les flux exergetiques aux différents points de l'installation en pourcentage du flux exergetique du combustible. ....	56
<b>Tableau IV-10:</b> Pourcentage du flux exergetique du combustible, les flux exergetique consommés, perdus et détruite au niveau des différents composants .....	57

# Liste des figures

<b>Figure I-1:</b> Schéma de principe de la cogénération.....	3
<b>Figure I-2 :</b> comparaison entre les rendements de la génération séparée et la cogénération ...	5
<b>Figure I-3 :</b> Les systèmes à couplage chaleur-force .....	6
<b>Figure I-4 :</b> Les systèmes a couplage force-chaleur :.....	6
<b>Figure I-5 :</b> Schéma de la cogénération avec une turbine à gaz avec récupération de chaleur ...	11
<b>Figure I-6 :</b> Schéma de la cogénération avec une turbine à gaz dans un cycle de CHENG ...	12
<b>Figure I-7 :</b> Les composants d'une microturbine.....	13
<b>Figure I-8 :</b> Schéma de la cogénération avec une micro turbine à gaz.....	13
<b>Figure I-9:</b> Turbine à vapeur à contre pression .....	15
<b>Figure I-10:</b> Turbine à condensation et à extraction .....	16
<b>Figure II-1</b> Schéma de l'installation.....	19
<b>Figure III-1:</b> Eléments concernés par le bilan d'énergie .....	25
<b>Figure III-2:</b> Schéma de la chaudière .....	29
<b>Figure III-3 :</b> Diagramme de Sankay représentant les flux d'énergie à travers l'installation, exprimés en % de l'énergie correspondant au flux de vapeur en sortie de chaudière.....	40
<b>Figure IV-1 :</b> Diagramme de Grassmann.....	57
<b>Figure IV-2 :</b> Diagramme de Grassmann représentant les flux d'exergie à travers l'installation, exprimés en % du flux exergetique du combustible.....	58
<b>Figure IV-3:</b> Diagramme des flux monétaires à travers un composant .....	61

# Nomenclature

Variable	Désignation	Unité
$\dot{A}$	Grandeur exprimée par Kmol de substance	[./kmol]
$\bar{A}$	Grandeur exprimée en KW	[kW]
$C_p$	Chaleur spécifique	[kJ/kg K]
$c$	coût unitaire	[DA/KWh]
$C_{AE}$	Cout d'achat des équipements	CHF
$f_{M\&S}$	constante de Marshall & swift	[-]
$g$	Enthalpie libre	[kJ/kg]
$h$	Enthalpie spécifique	[kJ/kg]
$h_0$	Enthalpie spécifique standard	[kJ/kg]
$h^0$	Enthalpie de formation	[kJ/kg]
$h_{fg}$	Enthalpie de vaporisation de l'eau	[kJ/kg]
$\dot{m}$	Débit massique	[kg/s]
$M$	Masse molaire	[Kg/kmol]
$n_p$	nombre de mole des espèces produites	[mol]
$n_R$	nombre de mole des espèces réactives	[mol]
$P$	Pression	[Pa]
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	[kJ/kg]
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	[kJ/kg]
$\dot{Q}$	Taux de transfert de chaleur	[kJ/s]
$R$	Constante des gaz parfait	[kJ/kmol °C]
$s$	Entropie spécifique	[kJ/kg K]
$s_0$	Entropie spécifique standard	[kJ/kg K]
$V$	Vitesse	[m/s]
$v$	volume massique de l'eau liquide	[m <sup>3</sup> /kg]
$\dot{V}$	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]
$W$	Teneur massique en eau	[-]
$\dot{W}$	Puissance utile	[kW]
$y_i$	fraction molaire	[%]
$y_i^e$	fraction molaire du constituant i dans l'environnement de référence	[%]
$z$	Hauteur par rapport à la position de référence	[m]

## Variables Grec

$\Delta$	Chute d'un paramètre	[-]
$\eta$	Rendement énergétique	[%]
$\rho$	masse volumique	[m <sup>3</sup> /Kg]

## Nomenclature

---

$\psi$	Exergie	[KJ/Kg]
$\beta$	constante développée à partir de corrélations statistiques pour le calcul de l'exergie chimique du combustible	[-]
$\varepsilon$	Rendement exergetique	[%]

### Indices

vc	Volume de contrôle
i	entrée du volume de contrôle
e	sortie du volume de contrôle
I, II, III, IV, V, VI, VII, VII	Systèmes de l'installation
1,2,3,4,5,6,6',7,8,9,10,10'	entrées et sorties des différents systèmes
f	fumées
c	combustible
a	air
p	purge
v	ventilateur
el	électrique
th	thermique
g	global
s	isentropique
ref	référence
F	Substance chimique
mel	mélange
T	Turbine
p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub>	pompe 1, pompe 2
<i>incin</i>	incinérateur
ch	chaudière

### Exposant :

p	Perdue
d	détruite
ph	physique
ch	chimique

### Abréviations :

TPH : tonne par heure

# Introduction générale :

L'énergie, ce moteur du développement et de la croissance sans laquelle toute action devient impossible, pose aujourd'hui un certain nombre de questions auxquelles il est indispensable de trouver des réponses urgentes, si l'on veut soutenir et faire durer les élans de progrès à travers le monde.

Les énergies fossiles sont en voie d'épuisement et le rythme effréné avec lequel elles sont consommées pose des problèmes très sérieux et très inquiétants pour l'environnement. L'énergie nucléaire, qui pourrait être une solution pour ces problèmes, en pose d'autres, encore plus compliqués pour l'environnement et la sécurité. Les énergies alternatives se développent à un rythme très insuffisant pour parvenir à temps à remplacer nos énergies fossiles. Des politiques sont initiées et soutenues pour économiser les ressources existantes et leur permettre de durer un peu plus, tout en polluant moins pour la satisfaction d'un même besoin en énergie. Et c'est là que la cogénération intervient pour améliorer de manière significative le rendement de conversion d'une énergie primaire qu'on a le souci de préserver, en deux produits énergétiques au lieu d'un seul.

La cogénération est une production combinée et indissociable d'énergie mécanique (travail) et thermique (chaleur ou plutôt le plus souvent, vapeur), par combustion d'énergie primaire dans un système opérant selon un cycle moteur à vapeur (turbine à vapeur, machine à vapeur) ou à gaz (turbine à gaz, moteurs à gaz ou à combustion interne de manière générale).

L'énergie mécanique est le plus souvent transformée en énergie électrique à l'aide d'un alternateur. Elle peut aussi entraîner directement des machines tournantes telles que : un compresseur frigorifique, une pompe, un ventilateur, etc.

L'énergie thermique est utilisée directement sous forme de chaleur, mais peut être également valorisée en production de froid, par des procédés d'absorption. La production simultanée d'électricité, de chaleur et de froid est appelée *trigénération*.

L'intérêt de la cogénération réside dans ses rendements énergétiques globaux (c'est-à-dire la somme des rendements électrique et thermique) qui sont élevés, le plus souvent compris entre 70 % et 90 %. Comparativement, les meilleurs rendements des centrales électriques sont de 41 % pour les centrales thermiques classiques et de 57 % pour les centrales à cycle combiné.

Les installations de génie climatique sont particulièrement favorisées, étant donné que les besoins en chaleur pour le chauffage des locaux sont concentrés en hiver, période où la demande en électricité est la plus forte et donc où elle est fournie par le réseau au coût le plus élevé. Ainsi, l'électricité produite par cogénération, qu'elle soit autoconsommée ou qu'elle soit revendue au réseau, est valorisée au mieux. De même, dans les pays ayant de forts besoins de conditionnement d'air en été, la production directe de froid par machines thermiques entraînant des compresseurs frigorifiques, complétée par l'utilisation de la chaleur cogénérée

dans des refroidisseurs à absorption, s'avère une technique très compétitive, sauf dans les pays, comme l'Algérie, où les faibles coûts de l'électricité en été favorisent la production de froid par moto-compresseurs électriques. Toutefois, dans tous les établissements où l'on peut avoir besoin simultanément de froid et de chaud (hôpitaux, aéroports, immeubles de bureaux, grands magasins, etc.), la trigénération peut se montrer intéressante.

La cogénération présente aussi un avantage très appréciable sous forme de disponibilité d'une autoproduction d'électricité permettant un secours en cas d'indisponibilité du réseau de distribution d'électricité. Ce secours peut être plus ou moins rapide et élevé suivant les filières utilisées. Mais, dans tous les cas où le secours électrique est indispensable (hôpitaux, aéroports, etc.), il peut remplacer ou suppléer une installation de groupes électrogènes classiques.

Le combustible primaire utilisé dans une installation de cogénération dépend de la technique choisie. S'il s'agit de moteurs alternatifs ou de turbines à combustion (à gaz), les combustibles utilisables sont le gaz naturel, le fioul domestique ou lourd (mais après traitement), ainsi que les autres types de gaz: gaz de pétrole liquéfié (GPL), biogaz, syngaz et gaz de décharge. Les systèmes de cogénération à base de chaudière et de turbine à vapeur, quant à eux, peuvent utiliser l'ensemble des combustibles destinés aux différents types de chaudières. Il peut donc s'agir de produits pétroliers, de charbons ou lignites, de gaz naturel, de pétrole, de biogaz, mais également de déchets ménagers et industriels, de bois ou de la biomasse en général. Dans ce dernier cas, la cogénération permet de valoriser au mieux ces combustibles à bas pouvoirs calorifiques et inciter à les utiliser afin de préserver les énergies "nobles" à chaque fois qu'une telle chose sera possible.

En Algérie, la cogénération est désormais encouragée, un décret exécutif a été publié dans le Journal Officiel en février 2015 fixant les modalités rendant possible l'installation de systèmes de cogénération en Algérie.

La présente étude a pour objectif d'étudier une installation devant cogénérer une puissance électrique de 6 MW, dont la moitié seulement sera destinée à l'autoconsommation de l'unité tandis que l'autre moitié sera cédée au réseau, et un débit de vapeur surchauffée de 56 tonnes par heure à 120°C, 1 bar pour les besoins d'un procédé. Ces besoins sont typiques d'une industrie très consommatrice de vapeur, telle une sucrerie ou une papeterie par exemple. Nous avons choisi un système de cogénération utilisant une turbine à vapeur à contre-pression et, comme un tel système peut brûler n'importe quel type de combustible, nous allons considérer l'option bois, pour une installation rurale, et l'option déchets pour une installation urbaine.

L'étude sera répartie en cinq chapitres. Dans le premier, nous présenterons le principe de la cogénération ainsi que les principaux types de cycles utilisés pour sa réalisation. La description détaillée de l'installation et la présentation de différentes données nécessaires pour la conduite de notre analyse feront l'objet du deuxième chapitre de ce rapport, le troisième chapitre consistera en une analyse énergétique détaillée de l'installation, elle sera suivie d'une analyse exergo-économique qui fera l'objet du quatrième et dernier chapitre de la présente étude.

# **Chapitre I : Introduction à la cogénération**

### I. Introduction :

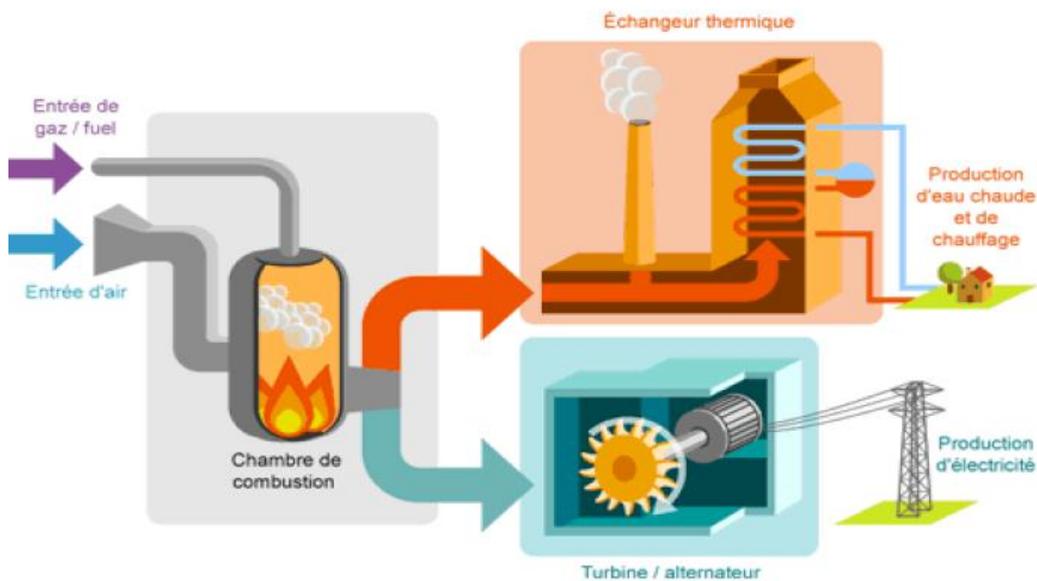
Un système de cogénération est un système énergétique qui convertit une énergie primaire en deux produits énergétiques utilisables :

- L'énergie mécanique, disponible sur l'arbre de la machine motrice, est utilisée pour entraîner une autre machine tournante (ventilateur, compresseur) ou le plus fréquemment un alternateur qui fournit du courant électrique.

- L'énergie thermique est disponible soit directement, soit après transformation, sous la forme d'un fluide caloporteur facilement utilisable : vapeur, eau chaude, air chaud, etc.

Les techniques de cogénération consistent à récupérer et à valoriser le plus possible ce deuxième produit, soit l'énergie thermique résiduelle et disponible. L'énergie électrique de la cogénération est soit autoconsommée, soit réinjectée sur le réseau électrique public suivant des conditions techniques et économiques fixées par les pouvoirs publics.

L'énergie thermique sert le plus souvent au chauffage des bâtiments et/ou à la production d'eau chaude sanitaire ou à des procédés industriels.



**Figure I-1:** Schéma de principe de la cogénération

Différentes gammes de cogénération sont possibles en fonction de la puissance électrique produite (voir tableau I-1 ci-dessous) :

**Tableau I-1:** Différentes gamme de cogénération [1]

Type de cogénération	Gamme de puissance	Utilisations
<b>micro-cogénération domestique</b>	$P_{\text{électrique}} < 5 \text{ kWe}$	maison individuelle
<b>micro-cogénération</b>	$5 \text{ kWe} < P_{\text{électrique}} < 50 \text{ kWe}$	petit immeuble, commerce, tertiaire...
<b>mini-cogénération</b>	$50 \text{ kWe} < P_{\text{électrique}} < 1 \text{ MWe}$	gros immeuble, centre commercial, site
<b>cogénération</b>	$1 \text{ MWe} < P_{\text{électrique}} < 250 \text{ MWe}$	industrie, réseaux de chaleur

## II. Etude comparative entre la génération séparée et la cogénération :

La cogénération permet d'économiser entre 15 et 30 % d'énergie primaire par rapport à la production séparée de ces mêmes quantités de chaleur et d'électricité [2]

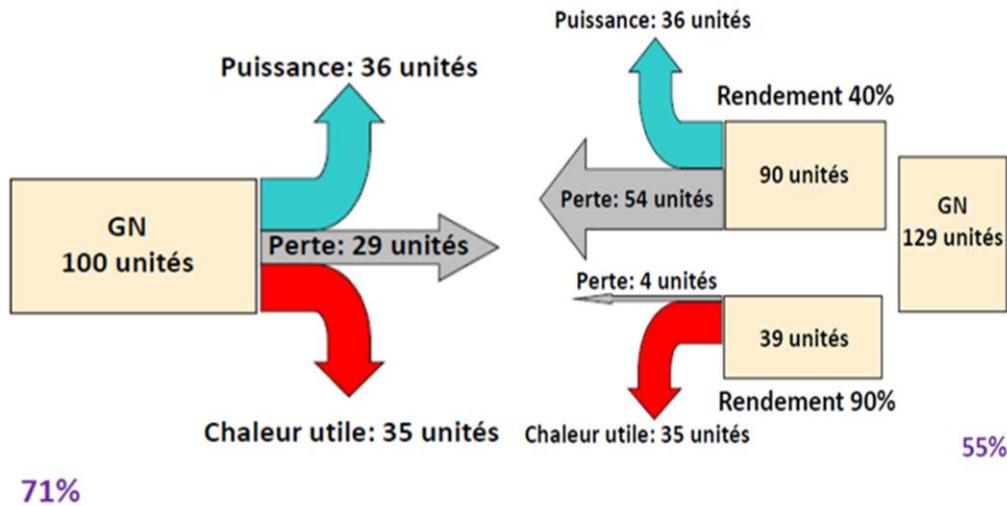
À titre d'illustration et par comparaison, une installation qui produit la même quantité de chaleur et d'électricité (36 unités d'électricité et 35 unités de chaleur), deux solutions sont possibles :

1. Une unité de cogénération au gaz naturel, avec un rendement électrique de 36 % et un rendement thermique de 35 %, va consommer 100 unités d'énergie primaire avec un rendement total de 71%, les diverses pertes représentent donc 29%.

2. Une centrale électrique (turbine à gaz ou à vapeur) avec un rendement de 40 % va consommer 90 unités d'énergie primaire, et une chaudière avec un rendement annuel de 90 % va consommer 39 unités d'énergie primaire. Le total pour les filières séparées s'élève donc à 129 unités d'énergie primaire avec un rendement total de 55 % et les diverses pertes du procédé représentent donc 45%.

Cette comparaison met en évidence une économie d'énergie primaire pour une même quantité de chaleur et d'électricité produite. L'économie d'énergie primaire est alors égale à :  
 $129 - 100 = 29 \text{ unités}$

Exprimée par rapport à la consommation totale d'énergie primaire, l'économie est donc de :  $29/129 = 22\%$



**Figure I-2 :** comparaison entre les rendements de la génération séparée et la cogénération [2]

### III. Les différentes classes de systèmes de cogénération :

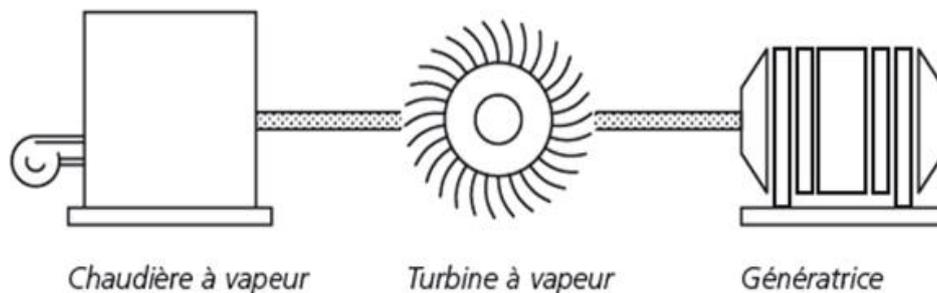
Le développement de la cogénération peut procéder de deux logiques distinctes, selon que l'objectif principal est la production d'électricité ou de chaleur. Une première logique consiste à récupérer la chaleur des centrales électriques pour alimenter des processus industriels ou des équipements de chauffage urbain. Une seconde logique consiste à orienter une partie de l'énergie produite dans des installations produisant de grandes quantités de chaleur pour obtenir une génération électrique d'appoint.

Généralement, les objectifs poursuivis par la cogénération sont doubles : d'une part réaliser des économies d'exploitation, et d'autre part garantir la sécurité d'approvisionnement en électricité d'une partie au moins des unités. Compte tenu de leurs finalités, on peut regrouper les installations de cogénération en trois classes [1];[2].

#### III.1. Les systèmes à couplage chaleur-force :

Le principe de fonctionnement du couplage chaleur force est simple : une chaudière à vapeur actionne une turbine à vapeur qui, à son tour, entraîne une génératrice. On produit donc d'abord de la chaleur (plus précisément de la vapeur) et ensuite de la force motrice (qui va se transformer en courant électrique).

Les installations "chaleur-force" où la chaleur constitue le produit de base, l'électricité n'étant qu'un sous-produit permettent de mieux valoriser le combustible. C'est le cas des usines grosses consommatrices de chaleur ou des centrales de chauffage urbain ou d'incinération d'ordures ménagères. La priorité est accordée à la fourniture de la chaleur, l'électricité, facilement transportable, est injectée dans le réseau public de distribution de puissance.

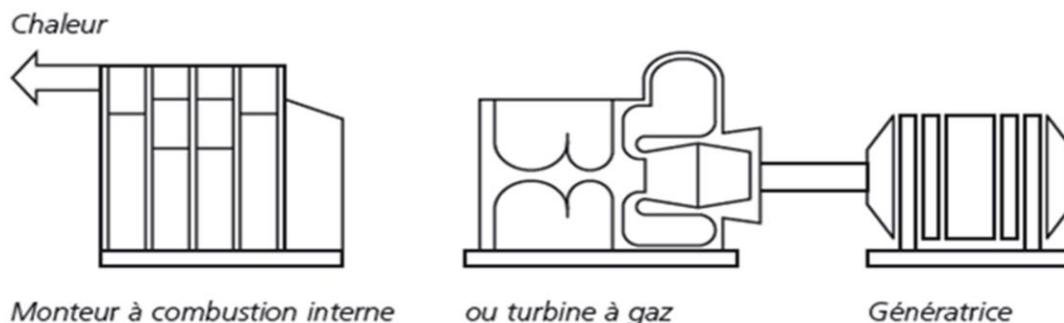


**Figure I-3** : Les systèmes à couplage chaleur-force

### III.2. Les systèmes à couplage force-chaleur :

Le principe de fonctionnement du couplage force chaleur est comme suit : une turbine à gaz ou un moteur thermique produit tout d'abord de la force ensuite, par le biais de la génératrice qui lui est accouplée, produit du courant électrique. La chaleur utile est récupérée en tant qu'énergie secondaire des produits de combustion de la turbine ou de l'eau de refroidissement et des gaz d'échappement du moteur thermique.

C'est le cas des installations dites à « énergie totale », autrement dit, qui cherchent à assurer l'autonomie sur le plan électrique, la chaleur étant qu'un sous-produit. Il s'agit généralement d'usines non reliées au réseau ou de navires.



**Figure I-4** : Les systèmes à couplage force-chaleur :

### **III.3. Les systèmes à impératif économique :**

Ce type d'installations est dimensionné de telle sorte qu'un possible surplus, manquant de puissance ou de chaleur peut être accommodé avec l'aide des réseaux publics d'électricité et de chaleur.

C'est le cas des installations non autonomes, sous-dimensionnées pour des raisons économiques, pour lesquelles un complément est assuré, pour l'électricité par le réseau de distribution, et pour la chaleur par une chaufferie classique. L'installation ne fonctionne que quand les tarifs de l'électricité sont élevés et les besoins de chaleur importants.

### **IV. Intérêts de la cogénération :**

- La cogénération se caractérise par un excellent rendement énergétique. Elle permet des économies d'énergie primaire par rapport à des productions distinctes d'électricité (centrales électriques) et de chaleur (chaudières des utilisateurs).

- Réduction des besoins d'approvisionnement de combustible, entraînant une réduction des besoins logistiques pour transporter et stocker le combustible.

- Compétitive par rapport à des moyens de production centralisés, la cogénération présente également un intérêt en terme de diversification du parc de production électrique et peut permettre dans certaines conditions d'éviter des coûts de développement des réseaux électriques et des pertes en ligne.

- Elle constitue un facteur de compétitivité pour les entreprises présentant des besoins de vapeur importants (chimie, industrie papetière, industrie sucrière, industrie automobile...).

- En conjuguant une production de vapeur à une production d'électricité, soit autoconsommée, soit vendue au réseau, la cogénération peut réduire leur facture énergétique et leurs émissions polluantes, diminuer la sensibilité aux évolutions des coûts énergétiques et assurer le secours électrique en cas d'incidents sur le réseau public.

- La cogénération est également une solution énergétique attractive pour le secteur tertiaire (hôpitaux, aéroports, écoles...) ainsi que pour les collectivités locales (réseaux de chaleur alimentant des ensembles immobiliers et valorisation énergétique des ordures ménagères)

- Dans certains cas, lorsque des combustibles de biomasse et de déchets tels que les gaz de raffinerie, de déchets agricoles ou d'industrie de transformation (issue d'une digestion anaérobie ou gazéifié) sont disponibles, ces substances peuvent être utilisées comme combustibles pour les systèmes de cogénération, augmentant ainsi la rentabilité et réduisant d'autant la nécessité d'éliminer ces déchets.

### V. **Limites de la cogénération :**

- La contrainte majeure de la cogénération est d'avoir un ou plusieurs consommateurs pour la chaleur ou la vapeur produite proche de la centrale de cogénération, car le transport est impossible.

- Les investissements sont élevés, imposés par la technicité des installations ; celles-ci doivent être complètes et bien adaptées. Le problème est surtout délicat lorsqu'il s'agit d'ajouter une cogénération dans une chaufferie existante.

### VI. **Pourquoi la cogénération ? [2] ;[3] ;[4].**

Partant du constat que la combustion se déroule à des températures supérieures à 1000°C, alors que les besoins en chaleur ou en chauffage d'un particulier ou un industriel se manifestent à des températures allant de 80°C à 300°C, la cogénération devient alors l'outil tirant efficacement partie de cet écart de température.

Quelles sont alors les raisons pour lesquelles il serait judicieux de passer à la cogénération ?

La cogénération est un concept énergétique, utilisée depuis le début de la révolution industrielle, elle s'inscrit actuellement dans une démarche de développement durable.

L'application du principe de cogénération permet une économie d'énergie primaire significative en comparaison avec les méthodes de génération séparées. On a alors une meilleure utilisation de l'énergie contenue dans le combustible.

Un des avantages de ce principe est sa valorisation des énergies alternatives : n'importe quel combustible ou source de chaleur à un potentiel suffisamment élevé peut être utilisé.

C'est le seul système capable de s'adapter :

- au charbon, utilisé pour les grandes puissances vu son faible prix ;
- aux ordures ménagères et aux déchets divers brûlés en usines d'incinération ;
- aux chaleurs diverses récupérables sur des processus industriels. Ce qui confère à ce principe une certaine indépendance par rapport aux prix des combustibles fossiles et donc un gain économique attrayant.

Construire une installation de cogénération prend moins de temps qu'une installation classique, par ailleurs n'étant pas volumineuse, cette installation peut être implémentée à une usine déjà existante. Aussi, la cogénération permet la production décentralisée d'énergie électrique, elle évite alors d'importantes pertes supplémentaires "en ligne", par effet Joule, elle

implique donc des infrastructures moins coûteuses, moins polluantes visuellement que celles centralisées.

Lorsque la cogénération se substitue à une production d'énergie à partir de pétrole ou de gaz, elle limite l'émission des polluants (SO<sub>2</sub> , NO<sub>x</sub> , poussières, etc.) et des émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère.

### VII. **Qui peut utiliser la cogénération ?**

Une cogénération est envisageable chaque fois que les besoins thermiques (chauffage, eau chaude ou encore en vapeur) sont continus tout au long de l'année et a minima sur les mois d'hiver, pour s'assurer d'une durée d'utilisation suffisante pour la rentabilité de l'opération. Il s'agit alors d'une opération de production décentralisée d'électricité.

La cogénération peut être utile et économiquement viable pour les circonstances suivantes :

- Tout processus industriel ou groupe de bâtiments qui a un besoin assez élevé à la fois d'énergie thermique et d'électricité.
- Tout processus industriel qui a une exigence constante pour la fourniture de la vapeur ou d'eau chaude.
- Tout processus industriel qui produit des déchets combustible en tant que sous-produit, surtout quand ces déchets sont coûteux à éliminer par d'autres moyens.
- Les déchets des sites d'enfouissement produisent du méthane lors de leur décomposition. On peut contrôler les émanations du biogaz et les diriger dans un réseau de captage de manière à l'utiliser comme combustible pour des projets de production d'électricité, de chaleur ou de froid.

Les meilleurs sites potentiels où on peut intégrer une installation de cogénération peuvent être les piscines, les réseaux de chaleur (où une base peut être assurée par la cogénération), mais aussi les écoles professionnelles avec internat, les groupes résidentiels, les hôpitaux, dans le secteur privé, les hôtels, les bâtiments d'élevage, les serres maraîchères et horticoles, les scieries.

Actuellement, les industries sont les grands utilisateurs de la cogénération. C'est aussi le segment de cogénération qui a le plus grand potentiel de croissance à court terme, où la plus grande capacité se trouve dans les sites qui ont une grande charge de vapeur tel que :

- L'agroalimentaire
- Les fabrications des briques et d'argile
- la production du ciment et de la céramique
- Les industries chimiques
- Les papeteries
- L'industrie du textile

### Exemple : le secteur agroalimentaire [5] :

Dans les sucreries par exemple La production de sucre est un processus intensif en énergie. L'optimisation énergétique est un facteur clé de la compétitivité du secteur. Elle concourt à la réduction de son impact sur l'environnement.

En sucrerie, les économies d'énergie s'effectuent principalement par :

- Des installations de cogénération efficaces, qui permettent aux usines d'être autosuffisantes (voire excédentaires) en électricité
- Un recyclage optimal de la vapeur produite lors de l'évaporation de l'eau du jus de la betterave
- Un renforcement de l'efficacité technique et thermique du matériel utilisé : chaudières, évaporateurs, etc ...

La cogénération est la solution pour rendre autonomes les usines en vapeur et en électricité durant la campagne sucrière (>100 jours/an) et pour l'utilisation optimale de l'énergie primaire.

## VIII. Equipements et technologies

La plupart des génératrices électriques d'une centrale à cogénération utilisent une turbine à gaz, une turbine à vapeur, le Cycle combiné gaz-vapeur ou un moteur à pistons. Des technologies émergentes comme les piles à combustible peuvent également être rencontrées.

En plus de ces équipements d'électricité, un autre élément essentiel dans une centrale à cogénération est le système de récupération de la chaleur dégagée par ces équipements. Cet équipement sera différent selon le type de centrale électrique, les températures désirées et les caractéristiques de la charge thermique, on trouve en général des chaudières ou des échangeurs de chaleurs.

L'intérêt d'une cogénération est d'autant plus important qu'elle peut faire usage d'un combustible alternatif comme la biomasse. Le tableau suivant montre les voies de la valorisation de la biomasse par cogénération.

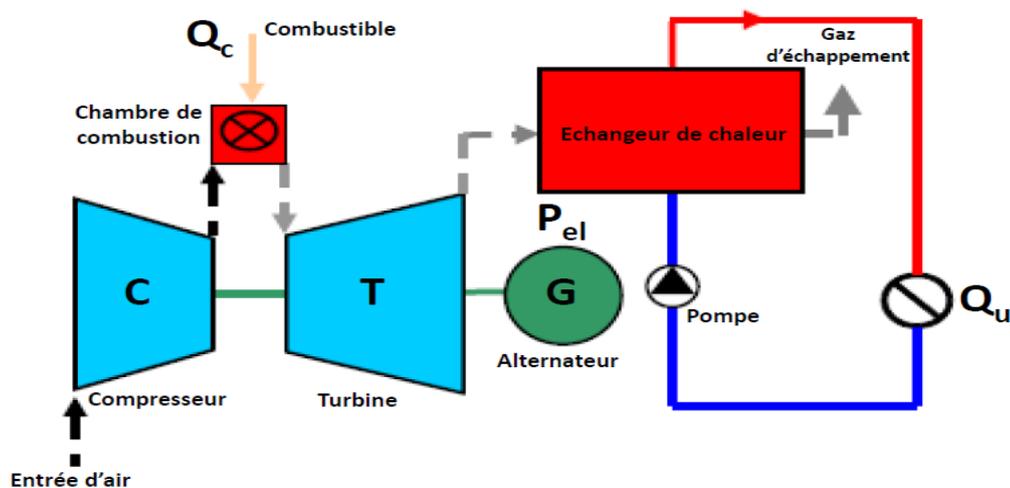
**Tableau I-2:** Les différentes voies de la valorisation énergétique de la biomasse [6]

technologies utilisés	Valorisation énergétique de la biomasse
Moteur à gaz	Gazéification anaérobie
Moteur diesel	
Moteur à gaz	Liquéfaction
Turbine à gaz	
Pile à combustible	Gazéification thermique avec lavage
Moteur Stirling	
Turbine à vapeur	
Machine à vapeur	Combustion atmosphérique
Turbine type à vis	
Procédé ORC	
Turbine à gaz à cycle inverse	
Turbine à air chaud	

### VIII.1. Types d'utilisation de la turbine à gaz en cogénération

#### La turbine à gaz avec récupération de chaleur

Dans ce procédé, l'énergie résiduelle des gaz d'échappement de la turbine est entièrement utilisée pour les besoins de chauffage, les processus de séchage ou tout autre procédé nécessitant de l'énergie sous forme de chaleur [6]. Le schéma de principe de cette utilisation est donné à la figure I-6.



**Figure I-5 :** Schéma de la cogénération avec une turbine à gaz avec récupération de chaleur

### Applications:

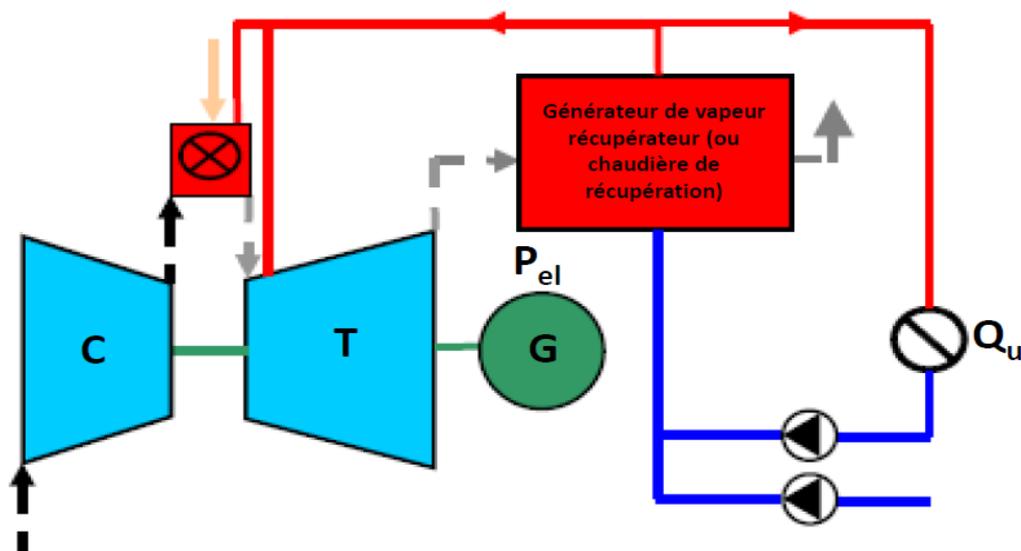
Ce type de cycle est utilisé pour:

- La génération de puissance électrique et de la chaleur à partir de ~ 30 kW<sub>el</sub>
- Le besoin en chaleur est constant

### Turbine à gaz dans un cycle "CHENG" ou "STIG"

Le cycle de CHENG propose une autre variante du cycle de turbine à gaz avec l'utilisation de la chaleur résiduelle. Une partie de la vapeur produite est introduite dans la chambre de combustion pour réaliser une combustion humide afin d'éviter la production des NO<sub>x</sub>, et dans la turbine pour augmenter sa puissance.

La production et le rendement électrique sont substantiellement augmentés. Il permet également une adaptation aux besoins en chaleur de l'installation, de sorte qu'on puisse utiliser plus ou moins de vapeur pour alimenter la turbine à gaz en fonction des besoins. Le schéma de principe de cycle de CHENG est donné à la figure I-6.



**Figure I-6 :** Schéma de la cogénération avec une turbine à gaz dans un cycle de CHENG

### Application:

- exigences de puissance et chaleur variables
- puissance électrique élevée ( ~ 20MW<sub>el</sub> et plus)

### Les microturbines:

Ce sont des systèmes de cogénération standardisés et commercialisés en groupe. Les composants d'un tel groupe sont montrés à la figure ci-dessous.

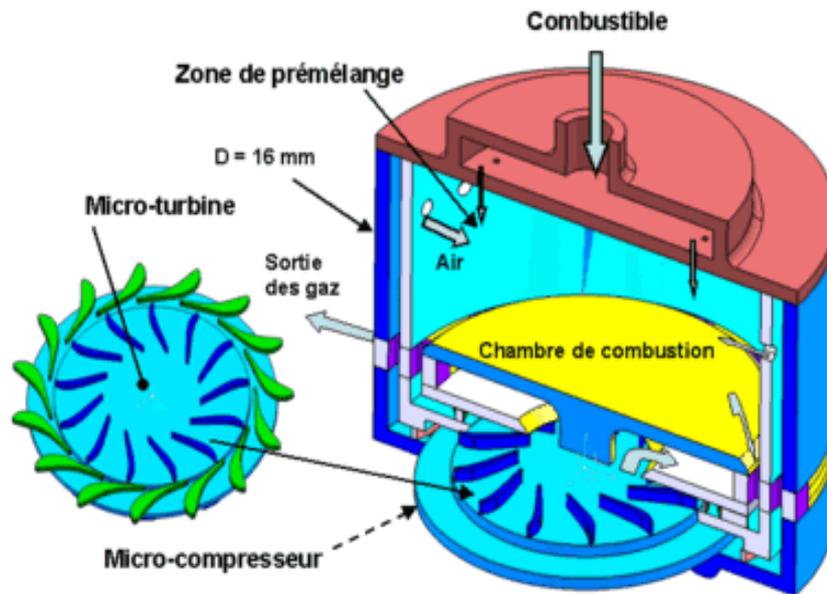


Figure I-7 : Les composants d'une microturbine

Les microturbines diffèrent à peine de la grosse turbine à gaz classique. Elles fonctionnent donc selon le même principe. Mais il y a aussi quelques différences. Les puissances sont beaucoup plus faibles ; la micro turbine est disponible pour des puissances de 30 à 300 KWe. Une microturbine dispose, pour atteindre un rendement électrique suffisant, d'un récupérateur où l'air comprimé, avant d'entrer dans la chambre de combustion est réchauffé par les gaz d'échappement chauds de la turbine [6].

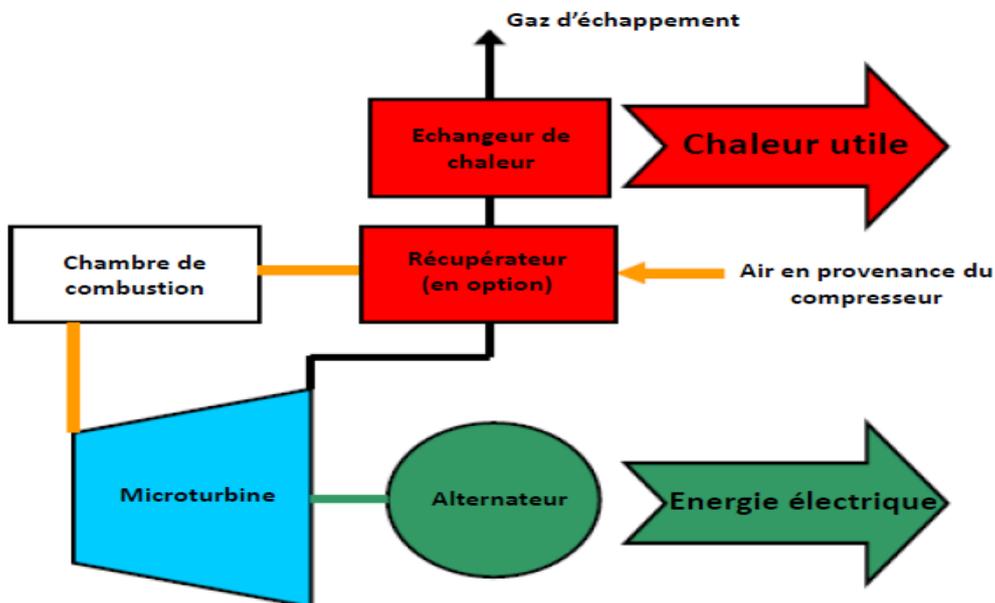


Figure I-8 : Schéma de la cogénération avec une micro turbine à gaz

Pourtant, l'efficacité électrique de l'installation est relativement faible (~ 15-25%) en raison de sa petite taille.

### Applications:

- production de vapeur dans les petites usines
- installations de séchage
- hôpitaux
- blanchisseries
- réseaux de chaleur locaux

Le tableau ci-dessous fait une comparaison des trois type turbine à gaz ci-dessus.

**Tableau I-3:** Comparaison entre les trois types de cycles à turbine à gaz [6]

	<b>Turbine a gaz avec recuperation de chaleur</b>	<b>Cycle de CHENG</b>	<b>Microturbine</b>
<b>Gamme de puissance</b>	20 MWe et plus	20 MWe et plus	30-300 KWe
<b>Efficacité électrique %</b>	25-35	~ 40	15-25
<b>Efficacité totale (electricité + chaleur)</b>	70-92	70-85	70-90
<b>Emission de NO<sub>x</sub> Mg/Nm<sup>3</sup></b>	~ 25	~ 25	~ 20

### VIII.2. Types de turbines à vapeur utilisés en cogénération :

#### Turbine à contre pression

L'opération à contrepression (pression de vapeur à la sortie de la turbine) désigne le mode d'exploitation des turbines où l'on ne condense pas la vapeur en sortie de turbine mais où on l'utilise pour combler les besoins d'un procédé ou de chauffage. Le schéma de principe de ce système est présenté à la figure ci-dessous

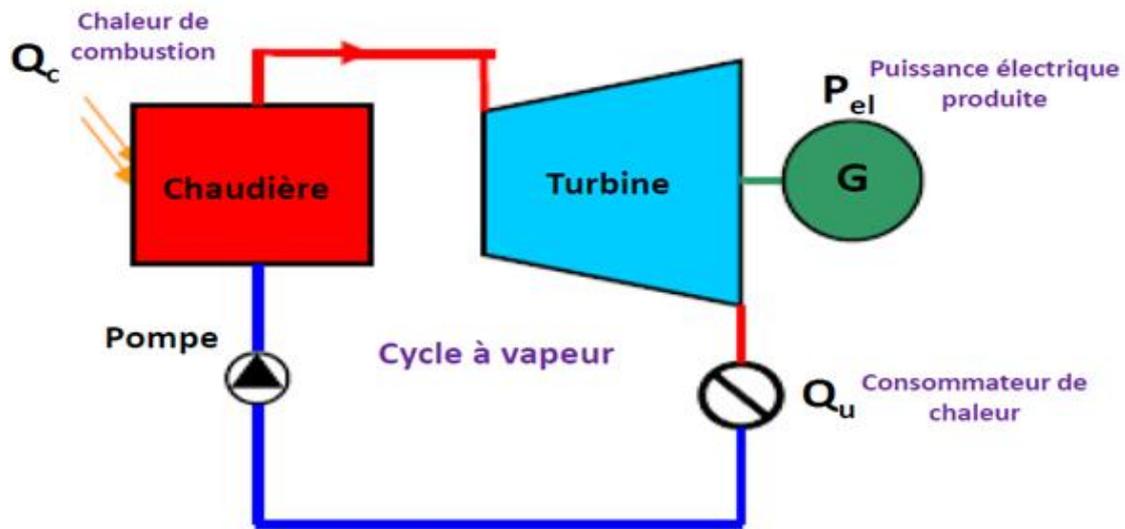


Figure I-9: Turbine à vapeur à contre pression

### Applications :

Ce type d'installation est applicable dans le cas :

- Des Industries et entreprises d'alimentation (électricité, chauffage urbain), (Production électrique allant de 0,5 à 30 MWe)
- Quand une quantité constante de chaleur est nécessaire

### Avantages /inconvénients des turbines à contre pression :

#### Avantages :

Ce type d'installation a une configuration particulièrement simple, constituée de peu de composants, aussi il ne lui est pas nécessaire de lui fournir de l'eau de refroidissement, ce qui lui confère un coût relativement bas.

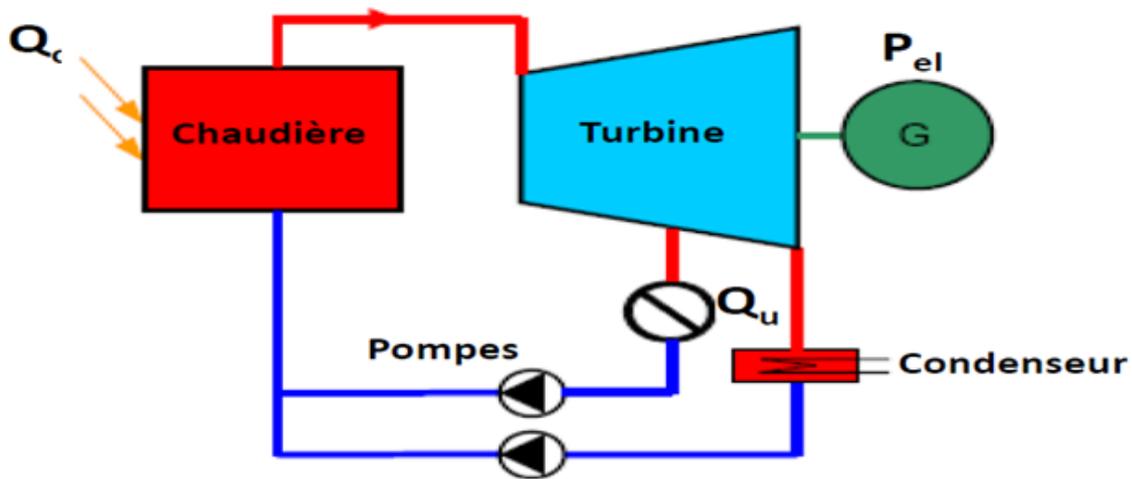
#### Inconvénients :

La turbine fonctionne sous une faible différence d'enthalpie, elle a donc un plus grand volume pour la même puissance produite comparées aux turbines à vapeur classiques.

### Turbine à condensation et extraction :

Dans un tel système, la charge thermique est obtenue par extraction de vapeur à partir d'un endroit judicieux dépendant des caractéristiques exigées par les procédés. La vapeur extraite à la sortie de la turbine est transférée vers le condenseur, à une température de 33 °C

et une pression de 0,05 bar par exemple. Le schéma de principe de fonctionnement est montré à la figure I-10.



**Figure I-10:** Turbine à condensation et à extraction

### Applications :

- productions d'électricité allant de 0,5 à 10 MWe1
- procédé exigeant des quantités variables de chaleur et d'électricité

### Avantage :

- N'importe quel type de combustible peut être utilisé (charbon, biomasse, déchets ménagers ; gaz, fuel)
- Cette technologie est mature et bien établie

### Inconvénients

- Faible rendement en conversion électrique
- Opération coûteuse

## IX. Conclusion :

Après avoir caractériser la cogénération et passer en revue les techniques les plus emplyées, nous allons décrire dans le chapitre suivant l'installation que nous nous sommes proposes d'analyser dans cette étude et présenterons les données nécessaires pour mener à bien cette analyse.

# **Chapitre II :**

## **Description de l'installation**

### **I. Introduction :**

L'unité à laquelle nous nous intéressons ici est un procédé type pouvant intervenir dans une industrie très consommatrice d'énergie thermique, comme une sucrerie ou une papeterie.

L'installation de cogénération dont il est question produit également l'énergie électrique nécessaire à l'autoconsommation de notre unité qui est évaluée à 3 MWe. Cependant les besoins thermiques du procédé étant importants, 56 tonnes de vapeur par heure à 1 bar ; 120°C ; nous avons le potentiel, étant donné que la vapeur est d'abord produite à 32 bars; 375 °C afin de pouvoir disposer d'une chute d'enthalpie utilisable pour la production d'électricité, de produire le double de l'énergie électrique nécessaire à l'autoconsommation de l'unité. Nous allons donc installer deux turbines à vapeur à contre-pression de 3 MW chacune. Une sera dédiée à l'autoconsommation du procédé, tandis que l'autre produira une puissance qui sera injectée dans le réseau. De cette façon, si l'une des deux turbines venait à tomber en panne, notre unité ne sera pas dans l'obligation d'acheter l'énergie électrique au réseau. Elle sera donc entièrement autonome, pourvue que sa sécurité soit garantie en ce qui concerne l'alimentation de la chaudière en combustible.

### **II. Description de l'installation :**

En plus de la chaudière et des deux turbines, l'installation comprend des équipements auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement de la chaudière. Ces différents équipements sont désignés par "Système" sur la figure II-1 ci-dessous et sont décrits brièvement ci après :

- Pompe d'eau d'appoint (Système I) : Cette pompe fait circuler l'eau qui vient de subir un traitement pour l'amener jusqu'à l'entrée de la chaudière à travers deux échangeurs de chaleur qui vont être décrits ci-dessous.  
Elle fait subir à l'eau une pressurisation l'amenant de 1 bar à 6 bars.
- Un préchauffeur d'eau (Système II) : Son rôle est de porter la température de l'eau d'appoint de 35 °C à 66 °C en utilisant les fumées avant de les évacuer dans l'atmosphère ou de les diriger vers les équipements de traitement en vue de les purifier.
- Un dégazeur (Système V) : Son rôle est de préchauffer l'eau d'alimentation afin d'éviter les problèmes de condensation à partir des fumées au niveau de l'économiseur, premier échangeur que va traverser l'eau à l'intérieur de la chaudière. Pour ce faire

## Description de l'installation

---

l'eau d'appoint qui arrive donc à l'entrée du dégazeur à 66 °C sera mélangée à un petit débit de vapeur surchauffée dérivée à partir de la sortie de la chaudière pour avoir à la sortie du dégazeur une eau alimentaire à la température désirée. Notons également que le dégazeur comme son nom l'indique, permet d'éliminer les gaz dissous dans l'eau, principalement l'air qui contient l'oxygène, afin de parer à tout risque de corrosion dans le circuit vapeur.

- Une pompe Alimentaire (Système VI) : C'est la pompe principale qui doit assurer la pression de service dans la chaudière et permettre de vaincre les pertes de charge du circuit d'eau. L'eau sera donc pressurisée à 35 bars pour sortir de la chaudière à 32 bars.
- Une vanne (Système IV) : Son rôle est de produire l'étranglement du débit de vapeur extrait à la sortie de la chaudière pour réduire sa pression de 32 bars à 6 bars tout en lui gardant son enthalpie (la vapeur y subit une détente isenthalpique)
- La tuyauterie reliant la chaudière aux turbines (Système VII) : Cette tuyauterie est en principe calorifugée, mais la vapeur y subit une perte de charges qui va réduire sa pression de 1 bar et une perte de chaleur qui va réduire sa température de 375°C à 370°C.
- Les deux turbines (Système VIII) : Elles sont identiques, munies chacune d'un alternateur séparé. Le débit total de vapeur sera donc partagé de façon équitable entre les deux et va y subir une détente jusqu'aux conditions imposées par le procédé, soit 120°C, 1 bar. Les turbines sont à contre-pression donc elles fonctionnent en cycle ouvert, nous supposons en effet que la vapeur sera entièrement consommée par le procédé et ne jouera pas uniquement le rôle d'un fluide caloporteur qui sera récupéré par un retour de condensat.
- La chaudière (Système III) : Pour répondre aux besoins du procédé, notre chaudière devra consommer soit 17 tonnes de combustible par heure, dans l'option chaudière à bois, soit 20 tonnes de combustible par heure, dans l'option chaudière à déchets.

Les conditions thermodynamiques des différents flux de matière sont indiquées sur la figure II-1 en chaque point de l'installation.

## Description de l'installation

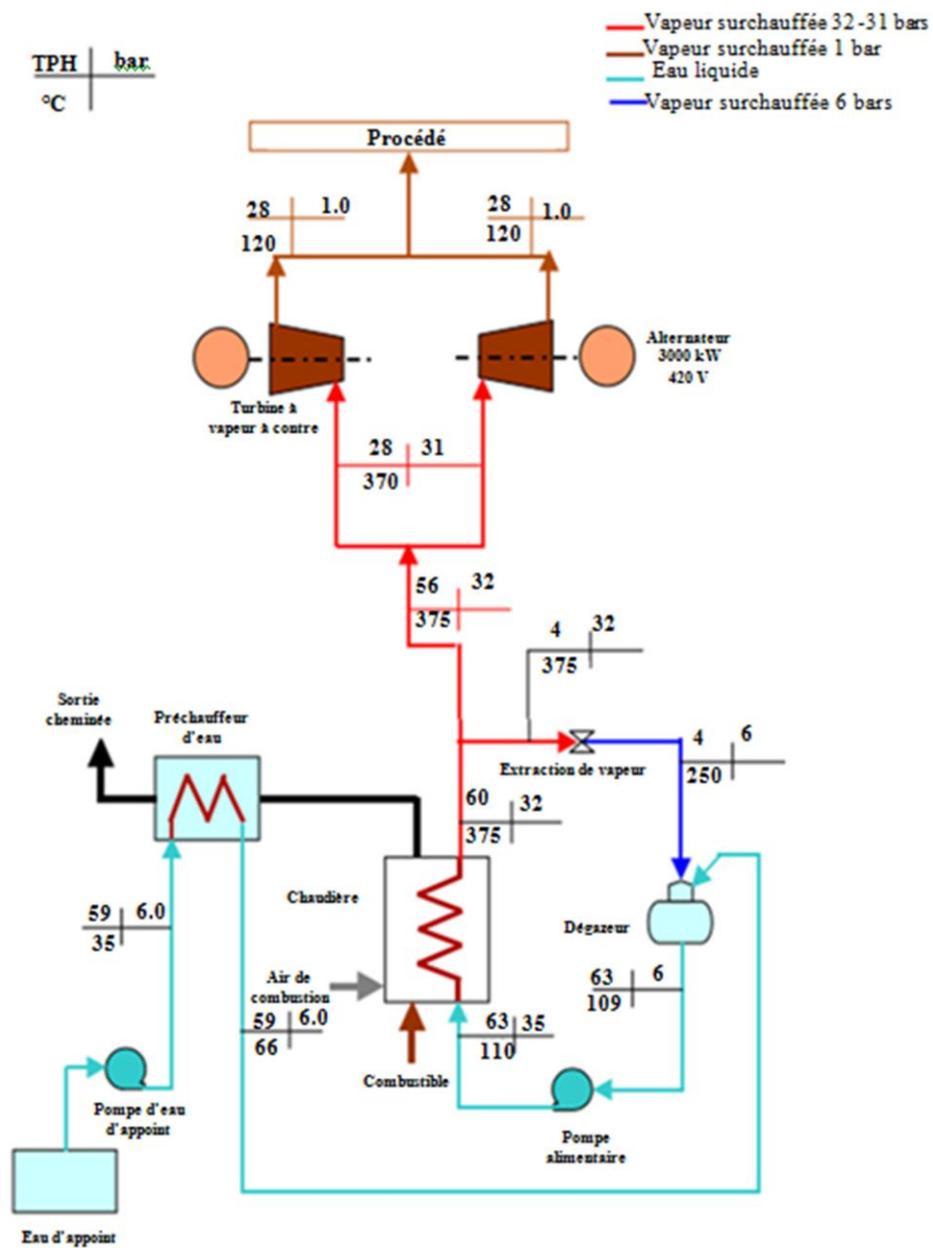


Figure II-1 Schéma de l'installation

### III. Présentation des données nécessaires aux calculs énergétiques et exergetiques

#### III. 1. Données concernant le circuit eau-vapeur :

Les données concernant le circuit eau-vapeur sont imposées par les conditions auxquelles nous devons livrer la vapeur au procédé et par la nature du combustible à utiliser (biomasse) qui ne permet pas de produire la vapeur avec des caractéristiques thermodynamiques plus élevées. En ce qui concerne les pertes dans la tuyauterie nous nous sommes inspirés des données d'une installation de traitement de canne à sucre. Connaissant la température et la pression en chaque point du circuit les enthalpies spécifiques correspondantes sont déterminées à partir des données thermodynamiques de la vapeur d'eau [7]. L'ensemble des données relatives à l'eau et à la vapeur d'eau sont récapitulées dans le tableau II-1 ci-dessous.

**Tableau I0-1:** Données relatives à l'eau et à la vapeur d'eau

	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/Kg)
1	16,39	34,9	0,1	146,5
2	16,39	35	0,6	147,19
3	16,39	66	0,6	276,69
4	17,5	109,5	0,6	459,5
5	17,5	110	3,5	463,72
6	16,68		3,2	3169,62
6'	1,11		3,2	3169,62
7	1,11	351,9	0,6	3169,62
8	15,56	375	3,2	3169,62
9	7,78	370	3,1	3159,95
10	15,56	120	0,1	2716,57
<b>Purges</b>	0,83	240		1037,305

#### III.2. Données concernant l'air et les fumées.

L'air apparaît à un seul endroit de l'installation : à l'entrée de chaudière comme air de combustion à 25 °C avec un débit différent selon qu'on est dans l'option chaudière à bois ou dans celle à déchets.

## Description de l'installation

On a affaire au circuit des fumées à deux endroits de l'installation : à la sortie de la chaudière ( $f_1$ ) et à la sortie du préchauffeur ( $f_2$ ).

Le débit et les températures de ces fumées, comme le débit d'air, dépendant du type de chaudière : ces données seront donc différentes selon qu'on ait une chaudière à bois ou bien une chaudière à déchets.

Le tableau II-2 ci-dessous comprend les données nécessaires de l'air et des fumées pour les deux options de chaudières, ainsi que les débits et les pouvoirs calorifiques des combustibles correspondants.

Les tableaux II-3 et II-4 ci-dessous comprennent la composition des combustibles bois et déchets ainsi que la composition des fumées issues de la combustion pour un coefficient d'excès d'air de 1.35 pour le bois et 1.6 pour les déchets

**Tableau I0-2:** Données concernant le combustible, l'air et les fumées [8];[9].

		$C_p$ (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	
a	Bois	1,012	29,85	25	0,1	
	Déchets	1,012	35,12	25	0,1	
f1	Bois	1,096	34,59	148	0,1	
	Déchets	1,010	42,16	151	0,1	
f2	Bois	1,081	34,59	91	0,1	
	Déchets	0,990	42,16	100	0,1	
		PCI (kJ/kg)	PCS (kJ/kg)	Débit (t/h)	P (MPa)	T (°C)
c	Bois	12361,76	13 927,16	17	0,1	25
	Déchets	10805	12 323,15	20	0,1	25

**Tableau I0-3:** Composition massique élémentaire des combustibles déchets et bois[8];[9].

Elément →		H <sub>2</sub> O	C	H	O	N	Cl	S	Cendres
Déchets	% massiques →	<b>23.05</b>	31.61	4.07	23.43	0.93	-	0.16	16.76
Bois	% massiques →	<b>20</b>	40	4.64	34.72	0.16	0.02	0.04	0.42

## Description de l'installation

**Tableau I0-4:** Composition des fumées issues de la combustion d'un bois brut à 20% d'humidité et un déchet brut à 23.05% d'humidité [8];[9].

Rapport d'air ↓	Constituant i →	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Σ
	M <sub>i</sub>	44	18	64	28	32	
<b>Bois</b> α = 1.35	m <sub>i</sub> (kg/kg bois)	1.4667	0.6176	0.0008	4.8476	0.3819	7.3145
	x <sub>i</sub>	0.2005	0.0844	0.0001	0.6627	0.0522	1
	n <sub>i</sub> (kmol/kg bois)	0.0333	0.0343	0.00001	0.1731	0.0119	0.2527
	y <sub>i</sub>	0.1319	0.1358	0.00004	0.6851	0.0472	1
	y <sub>i</sub> M <sub>i</sub>	5.8036	2.4444	0.0026	19.1828	1.5104	<b>M<sub>f</sub> = 28.944</b>
<b>Déchets</b> α = 1.6	m <sub>i</sub> (kg/kg bois)	1,1590	0,5968	0,0031	4,9352	0,5615	7,2556
	x <sub>i</sub>	0,1597	0,0823	0,0004	0,6802	0,0774	1
	n <sub>i</sub> (kmol/kg bois)	0,0263	0,0332	0,00005	0,1763	0,0175	0,2533
	y <sub>i</sub>	0,1040	0,1309	0,0002	0,6957	0,0693	1
	y <sub>i</sub> M <sub>i</sub>	4,5748	2,3556	0,0124	19,4799	2,2162	M <sub>f</sub> =28.6389

#### IV. Conclusion :

Ces données sont extraites à partir de travaux que nous faisons en parallèle à celui-ci pour soutenir nos mémoires de master. Elles seront utilisées lors de l'analyse énergétique de l'installation que nous effectuerons au chapitre III, puis lors de l'analyse exergetique au chapitre IV.

# **Chapitre III:**

## **Analyse énergétique**

### I. Introduction :

Au chapitre précédent nous avons présenté l'installation de cogénération et nous savons que pour répondre aux besoins de notre procédé le système doit consommer 17 tonnes de bois par heure (respectivement 20 tonnes de déchets ménagers par heure). Il est clair que cette consommation de combustible alimente l'installation avec une quantité d'énergie plus importante que celle qui se retrouvera dans la vapeur du procédé et celle transformée en énergie électrique par les deux groupes turbo-alternateurs. Le but de ce chapitre sera d'effectuer les bilans d'énergie aux différents éléments afin d'établir de quelle manière et à quelles endroits se dissipe l'énergie à travers l'installation.

Mais avant de procéder à l'analyse énergétique proprement dite il nous paraît indispensable de rappeler l'expression générale du principe de conservation d'énergie pour un système ouvert (Volume de contrôle), étant donné que tous les éléments auxquels nous aurons affaire sont des systèmes ouverts.

### II. Rappel de l'expression du bilan d'énergie pour un système ouvert en régime permanent

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i \right) = \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \quad (III.1)$$

Avec :

$\dot{Q}_{vc}$  : Taux de transfert de chaleur reçu par le volume de contrôle

$\dot{W}_{vc}$  : Puissance utile produite par le volume de contrôle

$\dot{m}$  : Débit massique

$h$  : Enthalpie

$V$  : Vitesse

$z$  : Hauteur par rapport à la position de référence

L'indice (i) correspond aux entrées du volume de contrôle

L'indice (e) correspond aux sorties du volume de contrôle

Dans l'expression ci-dessus, nous avons adopté la convention de signe suivante :  
W est positif lorsqu'il est produit par le système, négatif lorsqu'il est reçu par lui.  
Q est positive lorsqu'elle est reçue par le système, négative lorsqu'elle est cédée par lui.

**Hypothèses largement justifiées :**

- Variations d'énergie potentielle et d'énergie cinétique négligeables. Ce qui simplifie l'expression précédente pour donner :

$$\dot{Q}_{VC} + \sum \dot{m}_i (h_i) = \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e (h_e) \quad (III.2)$$

III. Schéma de l'installation :

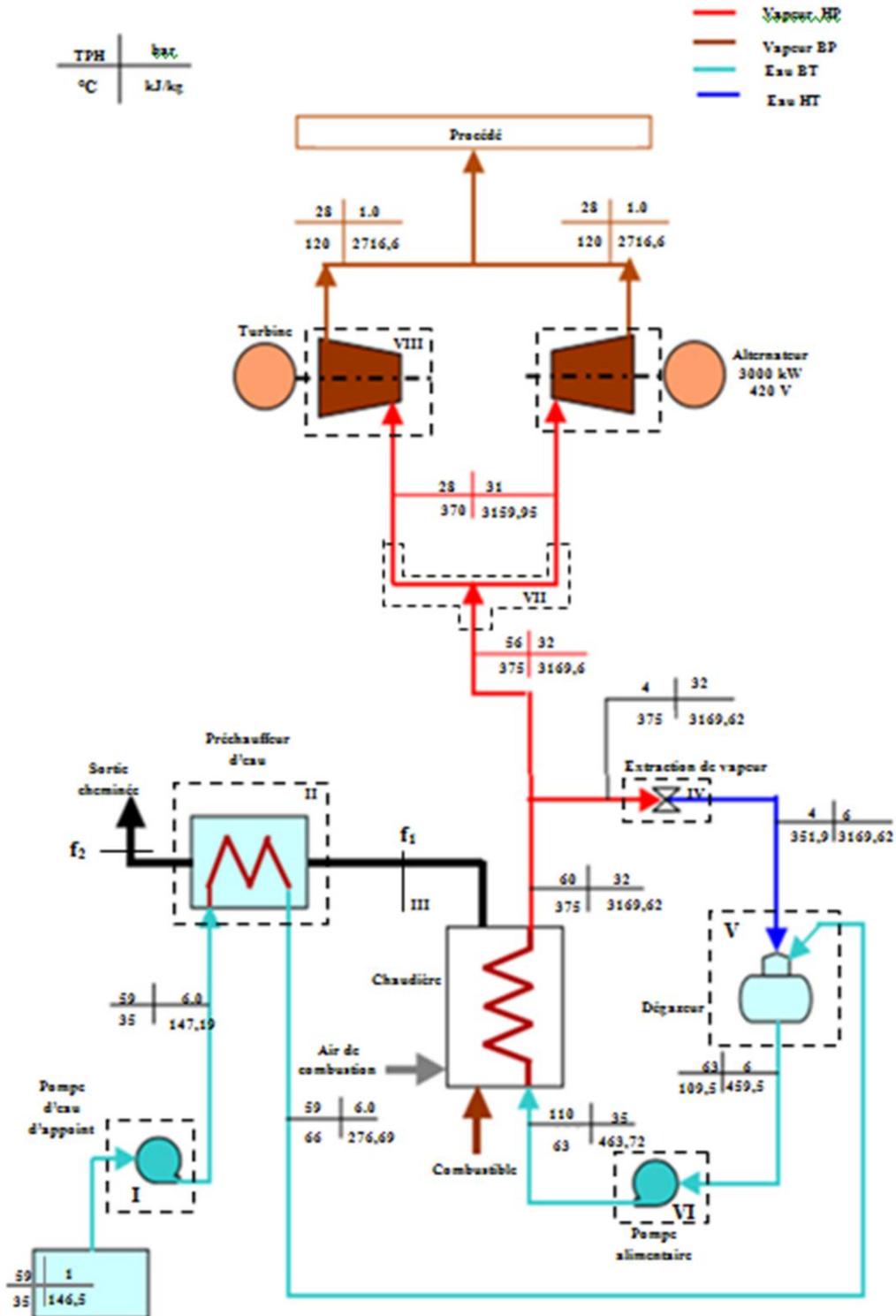


Figure III-1: Eléments concernés par le bilan d'énergie

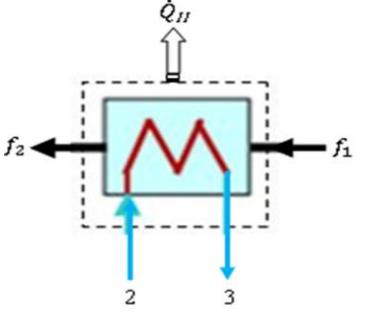
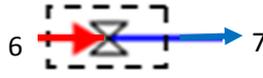
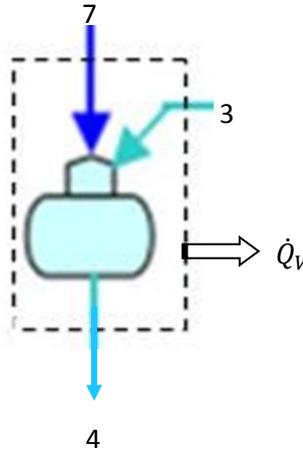
**IV. Bilans d'énergie pour les différents systèmes de l'installation :**

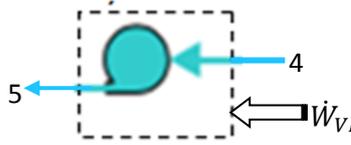
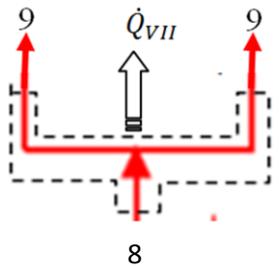
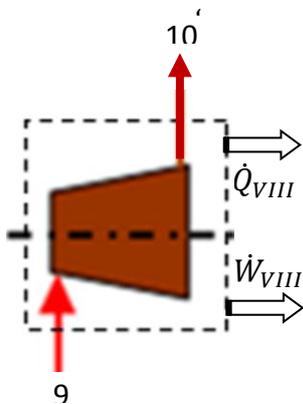
Notons que parmi ces systèmes, les pompes (I) et (VI), les turbines (VIII), la vanne (IV) présentent chacun une seule entrée et une seule sortie. Par ailleurs, en ajoutant l'hypothèse que les pompes et la vanne sont adiabatiques et en remarquant que la vanne ne produit aucune puissance, les expressions des bilans d'énergie pour ces systèmes ainsi que celles des rendements énergétiques sont présentées dans le tableau (III-1) ci après.

Les autres systèmes de l'installation peuvent être modélisés comme des échangeurs de chaleur où aucun travail n'est produit ( $\dot{W}_{VC} = 0$ ). Sauf dans le cas de la chaudière où on doit tenir compte de la puissance du ventilateur d'air. Le cas de la chaudière sera traité séparément plus loin dans le présent chapitre. Les expressions des bilans d'énergie et des rendements énergétiques pour le préchauffeur d'eau, le dégazeur et la conduite de vapeur sont également portées au tableau (III-1).

**Tableau III-1:** Bilans d'énergie et rendements énergétiques des différents volumes de contrôle de l'installation

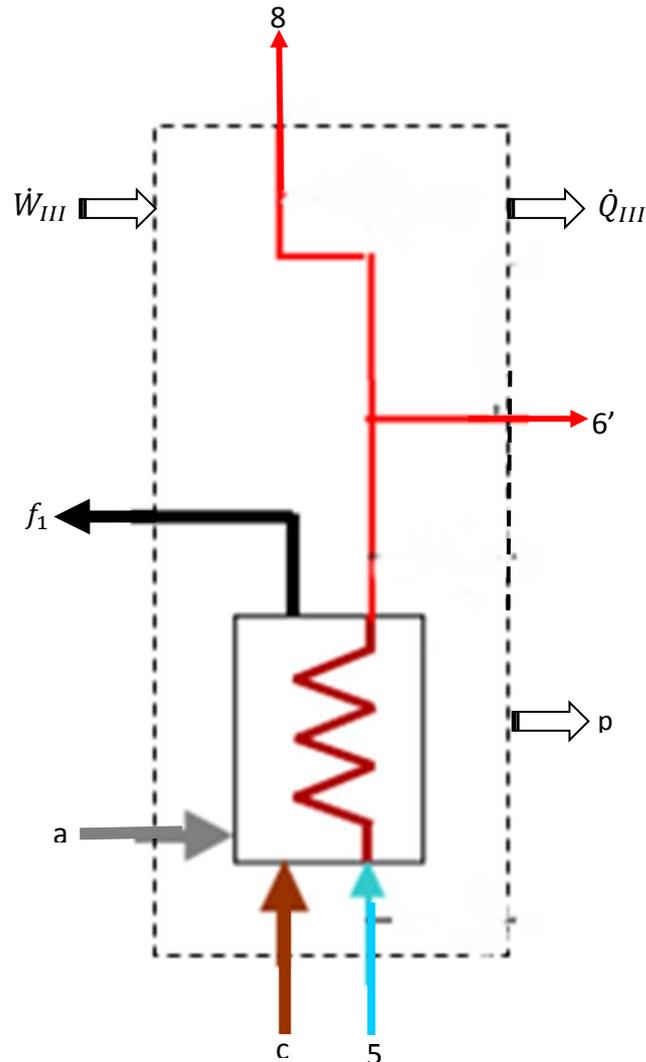
Système	Bilans et rendements	Schéma
<p><b>Système I</b> (Pompe I)</p>	<p>Bilan d'énergie :</p> $\dot{W}_I = \dot{m}_1(h_1 - h_2) \quad (III.3)$ <p>Rendement énergétique :</p> $\eta_I = \frac{\dot{W}_{IS}}{\dot{W}_I} \quad (III.4)$ <p>Avec :</p> <p><math>\dot{W}_I</math> : Travail actuel de la pompe (kW)</p> <p><math>\dot{W}_{IS}</math> : Travail isentropique de la pompe (kW)</p> $\dot{W}_{IS} = \dot{m}_1 v (P_1 - P_2) \quad (III.5)$ <p><math>v</math> : Volume massique de l'eau liquide 0,001m<sup>3</sup>/kg</p>	

<p><b>Système II</b> (Préchauffeur d'eau)</p>	<p>Bilan d'énergie :</p> $\dot{Q}_{II} = \dot{m}_2(h_3 - h_2) + \dot{m}_f(h_{f2} - h_{f1}) \quad (III.6)$ <p>Rendement énergétique :</p> $\eta_{II} = \frac{\dot{m}_2(h_3 - h_2)}{\dot{m}_f(h_{f1} - h_{f2})} \quad (III.7)$ <p>Avec :</p> <p><math>\dot{m}_2(h_3 - h_2)</math> : Energie reçue par l'eau au niveau du préchauffeur d'eau</p> <p><math>\dot{m}_f(h_{f1} - h_{f2})</math> : Énergie cédée par les fumées au niveau du préchauffeur d'eau</p>	
<p><b>Système IV</b> (Vanne)</p>	<p>Bilan d'énergie:</p> $h_6 = h_7 \quad (III.8)$	
<p><b>Système V</b> (Dégazeur)</p>	<p>Bilan d'énergie :</p> $\dot{Q}_V = \dot{m}_4 h_4 - (\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7) \quad (III.9)$ <p>Rendement énergétique :</p> $\eta_V = \frac{\dot{m}_4 h_4}{(\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7)} \quad (III.10)$ <p>Avec :</p> <p><math>\dot{m}_4 h_4</math> : Energie de l'eau à la sortie du dégazeur</p> <p><math>\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7</math> : Energie introduite dans le dégazeur</p>	

<p><b>Système VI</b> (Pompe II)</p>	<p>Bilan d'énergie :</p> $\dot{W}_{P_{II}} = \dot{m}_4(h_4 - h_5) \quad (III.11)$ <p>Rendement énergétique :</p> $\eta_{VI} = \frac{\dot{W}_{VIS}}{\dot{W}_{VI}} \quad (III.12)$ <p>Avec :</p> <p><math>\dot{W}_{VI}</math> : Travail actuel de la pompe (kW)</p> <p><math>\dot{W}_{VIS}</math> : Travail isentropique de la pompe (kW)</p> $\dot{W}_{P_{IIS}} = \dot{m}_4 v (P_4 - P_5) \quad (III.13)$ <p><math>v</math> : Volume massique de l'eau liquide 0,001m<sup>3</sup>/kg</p>	
<p><b>Système VII</b> (Conduite)</p>	<p>Bilan d'énergie :</p> $\dot{Q}_c = 2\dot{m}_9(h_9) - (\dot{m}_8 h_8) \quad (III.14)$ <p>Rendement énergétique :</p> $\eta_c = \frac{2\dot{m}_9 h_9}{\dot{m}_8 h_8} \quad (III.15)$ <p>Avec :</p> <p><math>\dot{m}_9 h_9</math> : Energie portée par l'eau à la sortie des conduites</p> <p><math>\dot{m}_8 h_8</math> : Energie portée par l'eau à l'entrée de la conduite</p>	
<p><b>Système VIII</b> (Turbine)</p>	<p>Bilan d'énergie :</p> $\dot{Q}_T = \dot{m}_9(h_{10'} - h_9) + \dot{W}_T \quad (III.16)$ <p>Rendement énergétique :</p> $\eta_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_9(h_9 - h_{10'})} \quad (III.17)$ <p>Avec :</p> <p><math>\dot{W}_T</math> : Puissance produite par la turbine</p> <p><math>\dot{m}_9(h_9 - h_{10'})</math> : Energie cédée par la vapeur d'eau au niveau de la turbine</p>	

## V. Bilan d'énergie de la chaudière

La chaudière est représentée par la figure ci-dessous :



**Figure III-2:** schéma de la chaudière

Elle reçoit l'eau à chauffer en (5), le combustible en (c) et l'air nécessaire à la combustion en (a).

A la sortie, on retrouve la vapeur d'eau surchauffée en (8) et les fumées issues de la combustion en (f1). Et enfin l'eau de purge en (P).

La chaudière est différente des autres échangeurs, par le fait qu'elle soit en même temps un réacteur.

Nous allons considérer que l'énergie libérée à l'intérieur par combustion y est amené par le combustible, elle est représentée par son pouvoir calorifique.

Le bilan d'énergie appliqué à la chaudière :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_c PCI + \dot{m}_a h_a \\ = \dot{W}_v + \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_p h_p + \dot{m}_f h_{f_1} + (2 \cdot 10^{-4}) \cdot (\dot{m}_c \cdot PCI) \end{aligned} \quad (III.18)$$

Avec :

$\dot{Q}_c$  : Chaleur dissipée dans le milieu ambiant

$PCI$  : Pouvoir calorifique inférieur du combustible

$\dot{m}_a$  : Débit massique d'air

$\dot{m}_p$  : Débit massique de purge

$\dot{m}_5$  et  $\dot{m}_6$  : Débits massiques de l'eau à l'entrée de la chaudière et de la vapeur surchauffée produite à la sortie respectivement

$\dot{m}_f$  : Débit massique des fumées

$\dot{m}_c$  : Débit massique du combustible

$\dot{W}_v$  : Puissance du ventilateur

Le dernier produit de l'expression ci-dessus :  $(2 \cdot 10^{-4}) \cdot (\dot{m}_c \cdot PCI)$  fait référence aux pertes d'énergie dues à la précipitation des cendres au fond de la chaudière, nous les avons estimées à 0,02% de l'énergie apportée par le combustible.

D'où :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_p h_p - \dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_v - \dot{m}_c PCI - \dot{m}_a h_a + \dot{m}_f h_{f_1} + (2 \cdot 10^{-4}) \\ * (\dot{m}_c \cdot PCI) \end{aligned} \quad (III.19)$$

Posons :

$$A = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_p h_p - \dot{m}_5 h_5$$

$$B = \dot{W}_v - \dot{m}_c PCI - \dot{m}_a h_a + \dot{m}_f h_{f_1} + (2 \cdot 10^{-4}) \cdot (\dot{m}_c \cdot PCI)$$

Le terme A fait intervenir uniquement les paramètres concernant l'eau et la vapeur d'eau

Le terme B fait intervenir les paramètres concernant une substance ou un sous système différent. Nous avons :

- $\dot{m}_f h_{f1}$  qui concerne les fumées
- $\dot{m}_a h_a$  qui concerne l'air de combustion
- $\dot{m}_c PCI$  qui concerne le combustible
- $\dot{W}_v$  qui représente la puissance du ventilateur

Ce terme dépend donc de la nature du combustible utilisé, nous aurons donc deux valeurs différentes de B selon le type de combustible utilisé

Soient :

$\dot{m}_c PCI$  : La quantité d'énergie reçue par la chaudière à travers le combustible

$(\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_5 h_5)$  : La quantité d'énergie transmise à l'eau du point (5) au point (8)

Le rendement énergétique de la chaudière :

$$\eta_{ch} = \frac{(\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_5 h_5)}{\dot{m}_c PCI} \quad (III.20)$$

## VI. Résultats de l'analyse énergétique:

### VI.1. Détermination de la puissance du ventilateur :

En prévision des pertes de charge relativement importantes qui caractérisent le circuit des fumées dans nos deux chaudières, notamment à cause des équipements de traitement que ces fumées doivent traverser avant de parvenir jusqu'à la cheminée, il est recommandé d'imprimer à l'air une surpression comprise entre 500 et 750 mmCE [10].

Nous optons pour un ventilateur capable de nous garantir une surpression de 500 mmCE.

La puissance du ventilateur doit être évaluée simplement par le produit de cette surpression exprimée en kPa par le débit volumique de l'air à l'entrée exprimé en m<sup>3</sup>/s. On a ainsi :

$$\Delta P = \rho g h = 10^3 \cdot 9.81 \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 4.9 \text{ kPa}$$

Le débit volumique d'air est obtenu à partir du débit massique et de la masse volumique. Cette dernière est obtenue grâce à l'équation d'état de l'air assimilé à un gaz parfait aux conditions d'entrée de 25°C et 1 atm :

$$\rho_a = \frac{M_a P}{RT}$$

$R=8,3144 \text{ kJ/kmol}^\circ\text{C}$  -  $M_a = 28,97 \text{ Kg/Kmol}$

La puissance du ventilateur sera donnée par :

$$\dot{W}_v = \dot{V}_a \Delta P = \Delta P \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} \quad (III.21)$$

La valeur de la puissance du ventilateur est donnée au tableau ci-après pour les deux combustibles utilisés.

**Tableau III-2:** Puissance du ventilateur suivant le type de combustible

	Bois	Déchets
$\dot{m}_a \text{ (kg/s)}$	35,12	29,85
$\dot{W}_v \text{ (kW)}$	-123,95	-145,84

### VI.2. Détermination des enthalpies des fluides aux points de transition entre les différents composants:

Pour le calcul des enthalpies des gaz, nous assimilons ces derniers à des gaz parfaits et nous appliquons la loi de Joule avec comme température de référence  $T_{\text{réf}} = 0^\circ\text{C}$ .

On aura pour l'air, à une température  $T$  donnée en ( $^\circ\text{C}$ ),

$$h_a = C_{p_a} T_a \quad \text{tel que : } C_{p_a} = 1,012 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Nous avons considéré qu'avant que la vapeur d'eau ne se retrouve sous forme de vapeur dans les fumées pour former avec les autres constituants de cette dernière un mélange assimilé à un gaz parfait ayant pour chaleur spécifique à  $T_{\text{fl}}$  :  $C_{p_{\text{fl}}}$ , l'eau était admise avec le combustible à l'état liquide. Il a donc fallu qu'elle prenne l'énergie nécessaire à son évaporation avant d'être portée en même temps que les fumées à la température  $T_{\text{fl}}$ , on a donc pour les fumées :

$$h_{f1} = C_{pf1}T_{f1} + W_f h_{fg} \quad (III. 22)$$

avec :

$W_f$  : Teneur massique en eau des fumées

$h_{fg}$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau admise avec le combustible à l'état liquide à 25°C

A présent nous allons présenter au tableau (III-3) ci après les différentes valeurs des données qui interviennent dans les bilans d'énergie établis ci-dessus :

**Tableau III.3:** Données intervenant dans les bilans d'énergie

		$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/Kg)	$\dot{m}h$ (kW)	
<b>1</b>		16,39	34,9	0,1	146,5	2401,14	
<b>2</b>		16,39	35	0,6	147,19	2412,44	
<b>3</b>		16,39	66	0,6	276,69	4534,95	
<b>4</b>		17,5	109,5	0,6	459,5	8041,25	
<b>5</b>		17,5	110	3,5	463,72	8115,10	
<b>6</b>		16,68		3,2	3169,62	52869,26	
<b>6'</b>		1,11		3,2	3169,62	3518,28	
<b>7</b>		1,11	351,9	0,6	3169,62	3518,28	
<b>8</b>		15,56	375	3,2	3169,62	49319,29	
<b>9</b>		7,78	370	3,1	3159,95	24584,41	
<b>10</b>		15,56	120	0,1	2716,57	42269,83	
<b>Purges</b>		0,83	240		1037,305	860,96	
	$C_p$ (kJ/kg.K)						
<b>a</b>	<b>Bois</b>	1,012	29,85	25	0,1	25,3	755,21
	<b>Déchets</b>	1,012	35,12	25	0,1	25,3	888,54
<b>f1</b>	<b>Bois</b>	1,096	34,59	148	0,1	368	12736
	<b>Déchets</b>	1,010	42,16	151	0,1	350	14750
<b>f2</b>	<b>Bois</b>	1,081	34,59	91	0,1	305	10552
	<b>Déchets</b>	0,990	42,16	100	0,1	309	13033
		<b>PCI</b> (kJ/kg)	<b>PCS</b> (kJ/kg)	<b>Débit</b> (t/h)	<b>Débit</b> (kg/s)	<b>T</b> (°C)	<b>P</b> (MPa)
<b>c</b>	<b>Bois</b>	12361,76	13 927,16	17	4,72	25	0,1
	<b>Déchets</b>	10801,94	12 323,15	20	5,56	25	0,1

**VI.3. Résultats des calculs des bilans d'énergie :**

**Tableau III.4:** Résultats des bilans d'énergie

Système	I	II		III		V	VI	VII	VIII
		Bois	Déchets	Bois	Déchets				
$\dot{W}$ (kW)	-11,31						-73,85		3 000
$\dot{Q}$ (kW)		-35,98	-35,9	-929,78	-630,93	-15,4		-150,46	-449,50

**Chaleur totale perdue dans l'installation :**

$$\dot{Q}_{Totale} = \dot{Q}_{II} + \dot{Q}_{III} + \dot{Q}_V + \dot{Q}_{VII} + \dot{Q}_{VIII} \quad (III. 23)$$

Le calcul donne pour la chaudière à bois :

$$\dot{Q}_{Totale-bois} = -1593 \text{ kW}$$

et pour la chaudière à déchets :

$$\dot{Q}_{Totale-dechets} = -1294 \text{ kW}$$

Les calculs de rendement pour chaque système ont donné les résultats figurant au tableau (III-5) ci-dessous :

**Tableau III.5 :** Rendements énergétiques des différents systèmes

Système	I	II		III		V	VI	VII	VIII
		Bois	Déchets	Bois	Déchets				
$\eta(\%)$	73	96	94	71	69	99	69	99	87

**VI.4. Rendements de la cogénération :**

On appelle rendement électrique du système de cogénération, le rapport de l'énergie électrique produite par le système sur l'énergie primaire présente dans le combustible :

$$\eta_{el} = \frac{\dot{W}_{el} - \dot{W}_I - \dot{W}_{VI} - \dot{W}_{VIII}}{\dot{m}_c PCI} \quad (III. 24)$$

On appelle rendement thermique du système de cogénération, le facteur de conversion de l'énergie primaire en énergie thermique transportée par la vapeur à la sortie du système:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{10} \cdot h_{10} - \dot{m}_5 h_5}{\dot{m}_c PCI} \quad (III. 25)$$

Le Rendement global de la cogénération est obtenu en sommant ces deux rendements :

$$\eta_g = \eta_{th} + \eta_{el} \quad (III. 26)$$

Les valeurs de ces rendements pour les deux combustibles considérés sont portées au tableau (III-6) ci-après :

**Tableau III.6:** Rendements de la cogénération

Données		$\dot{m}_c$ (kg/s)	PCI (kJ/k)	$\dot{W}_{el}$ (kW)	$\dot{W}_v$ (kW)	$\dot{W}_{PI}$ (kW)	$\dot{W}_{PII}$ (kW)	$\dot{m}_{10}$ (kg/s)	$h_{10}$ (kJ/kg)
	Bois		4,72	12361	3 000	-	-11,31	-73,85	15,56
Déchets		5,56	10801	3 000	-	-11,31	-73,85		
		<b>Bois</b>				<b>Déchets</b>			
Résultats	$\eta_{el}(\%)$	1turbine	4,78			4,37			
		2turbine	9.56			8.74			
	$\eta_{th}(\%)$	58,5				56,9			
	$\eta_g(\%)$	68.06				65.64			

## VII. Exploitation des résultats :

L'établissement des bilans d'énergie nous a permis de quantifier la dissipation d'énergie au niveau de chaque élément et par suite de le caractériser par un rendement énergétique qui joue le rôle d'indicateur de sa performance.

Le rendement donne une estimation de la perte relative d'énergie. Pour les rendements des éléments, l'énergie de référence par rapport à laquelle ils sont calculés est en général représentée par l'énergie maximale qui est disponible à leur niveau. C'est ainsi que par exemple, 1% de rendement de chaudière représente 1% de l'énergie fournie par le combustible, ce qui est énorme, alors que 1% de rendement de la conduite représente 1% de l'énergie disponible à la sortie de la chaudière, qui est moins bien importante. Par conséquent, il serait erronée de comparer les rendements de composants de nature différente entre eux. Ainsi, on peut affirmer que la pompe d'appoint ( $\eta = 73 \%$ ) a un meilleur rendement que la

pompe alimentaire ( $\eta = 69 \%$ ), mais il serait inexacte de dire que la tuyauterie ( $\eta = 99\%$ ) a un meilleur rendement que la turbine ( $\eta = 87 \%$ ). Le rendement d'un composant est plutôt un indicateur de sa propre performance, ce qui signifie que s'il est faible le composant fonctionne mal et on doit intervenir pour améliorer son fonctionnement par des mesures visant à augmenter son rendement.

L'énergie consommée par les pompes (I et II) représentant moins de 0.2% de l'énergie de référence choisie pour tracer le diagramme de Sankay (voir figure III-3 ci dessous), il n'y a quasiment rien à récupérer à leur niveau et ce, même avec une amélioration substantielle de leurs rendements respectifs. Le 1 % de pertes au niveau du dégazeur (V) et de la tuyauterie de transfert (VII) est inévitable, aucune isolation thermique ne peut être parfaite pour éliminer toute possibilité de dissipation de chaleur vers le milieu ambiant à de tels niveaux de température. Mais en fait, le dégazeur perd également de l'énergie par les fuites de vapeur inévitables associées au processus de dégazage thermique, ces fuites ne sont cependant pas quantifiables dans le cas présent car nous ne connaissons pas le débit de vapeur qui fuit.

Ensuite, les 4 à 6 % de pertes enregistrées dans le préchauffeur d'eau sont acceptables, car pour les réduire, il faudrait améliorer l'isolation thermique d'un échangeur volumineux, et le coût de cette opération il sera difficile de l'amortir avec les économies d'énergie qu'il induirait à cet endroit, où les niveaux de température sont bas.

En revanche, au niveau des turbines et de la chaudière, l'énergie mise en jeu est intense étant donné les niveaux élevés de température. Tout ce qui pourra être fait au niveau de ces composants pour améliorer leur rendement respectifs ne serait-ce que de 1 %, doit être tenté, car à coup sûr il sera rentable.

L'énergie dissipée sous forme de chaleur dans la turbine représente 15 % de la puissance électrique qu'elle est capable de produire. C'est énorme quand on sait qu'en général on fait de sorte qu'on puisse considérer la turbine adiabatique. On a certainement dû négliger l'isolation thermique de la turbine étant donné que sa puissance n'est pas très élevée, ce qui lui confère ce faible rendement énergétique de 87%.

Quant à la chaudière (III), dont le rendement est de 71 % dans le cas du bois (respectivement 69 % pour les déchets) pourrait sembler assez bas comparativement à celui, d'une chaudière classique au gaz naturel (supérieur à 80%), l'explication réside principalement

dans les pertes à la cheminée qui sont considérables par rapport à un combustible conventionnel et ce, pour trois raisons :

- La combustion a lieu en présence d'un excès d'air relativement important : 35% pour le bois et 60% pour les déchets. Cet excès est nécessaire pour réaliser une combustion complète et pour limiter la température de la flamme en-dessous de la température de ramollissement des cendres. La combustion du gaz naturel ne pose pas ce genre de problème, l'excès d'air nécessaire peut être aussi faible que 5% et les gaz de combustion ne contiennent pas de cendres. Donc la quantité de fumées produites par la combustion du bois, et surtout celle résultant de la combustion des déchets, sont bien plus importantes que celle issue de la combustion du gaz naturel. Cette situation entraîne une perte sensible à la cheminée plus importante dans le cas du bois et des déchets.

- Les fumées produites par la combustion du bois ou des déchets contiennent plus de vapeur que celles du gaz naturel, même si le rapport  $[H/C]$  est beaucoup plus grand dans le cas du gaz naturel ; il y a en effet la teneur en eau qui entre dans la composition du bois pour 20% et dans celle des déchets pour plus de 23%. La vapeur d'eau évacuée avec les fumées provoque donc une perte latente bien plus importante dans les cas du bois et des déchets qu'elle ne l'est dans le cas du gaz naturel.

- Et justement à cause du taux d'humidité élevé des fumées du bois et des déchets, leur température de rosée est plus élevée que celle des fumées du gaz naturel. Et comme les fumées doivent en général être évacuées à une température supérieure à leur point de rosée, la température à la cheminée sera plus grande pour le bois et les déchets que pour le gaz naturel, ce qui augmente encore leurs pertes sensibles à la cheminée.

A présent, examinons les rendements qui caractérisent l'ensemble de l'installation. Tout d'abord, le rendement électrique qui représente le pourcentage de l'énergie primaire ramenée par le combustible dans le système, qui est converti en énergie électrique : ce rendement est de 9.56 % pour le bois et 8.75 % pour les déchets. Ce qui signifie que moins de 10 % de l'énergie primaire est valorisée en électricité. Rappelons ici que la moitié de cette énergie sera consommée par le procédé, tandis que l'autre moitié sera vendue.

Ensuite, le rendement thermique, qui représente le pourcentage d'énergie primaire qui sera mis à la disposition du procédé sous forme de chaleur, il est de 58.5 % pour le bois et 56.9 % pour les déchets. Donc l'énergie utile est produite pour 58.5 % sous forme de chaleur

et 9.56 % sous forme d'électricité dans le cas du bois, et pour 56.9 % sous forme de chaleur et 8.74% sous forme d'électricité dans le cas des déchets. Soit dans les deux cas un rapport électricité-chaleur de 0.16, traduisant la très forte tendance de notre système de cogénération à la production thermique plutôt qu'électrique.

Le rendement de la cogénération qui ne fait pas de différence entre le produit électrique et le produit thermique, est obtenu par la sommation des deux rendements. Il est de 68.06 pour le bois et de 65.64 % pour les déchets. Etant donné que ces rendements sont calculés par rapport à l'énergie primaire, soit celle par rapport à laquelle sont calculés les rendements de la chaudière, il est donc sensé de les comparer à ces derniers. Ainsi, dans le cas du bois, le rendement de la chaudière (71%) dépasse celui de la cogénération (68.06%) de 2.94 %. Ce chiffre représente les pertes d'énergie du circuit vapeur correspondant aux lignes de transfert de la sortie chaudière jusqu'à la livraison de vapeur au procédé, y compris celles qui ont lieu dans les turbines. On peut donc conclure dans le cas de la combustion, du bois que les pertes d'énergie se répartissent pour 29 % dans les processus ayant lieu dans la chaudière et pour 2.94% dans les processus ayant lieu dans les lignes de transfert de vapeur et dans les turbines. Dans le cas des déchets, ces pertes sont réparties pour 31% dans les processus ayant lieu dans la chaudière et 3.36 % dans les processus ayant lieu dans les lignes de transfert et les turbines.

Notons enfin que tous les rendements affichent une valeur légèrement plus basse pour les déchets comparativement au bois, l'énergie primaire est donc moins bien utilisée dans le cas des déchets que dans le cas du bois : on perd 2% de plus dans la chaudière et 0.42% dans les lignes de transfert et les turbines pour aboutir à un rendement de cogénération de 2.42 % plus bas dans le cas des déchets.

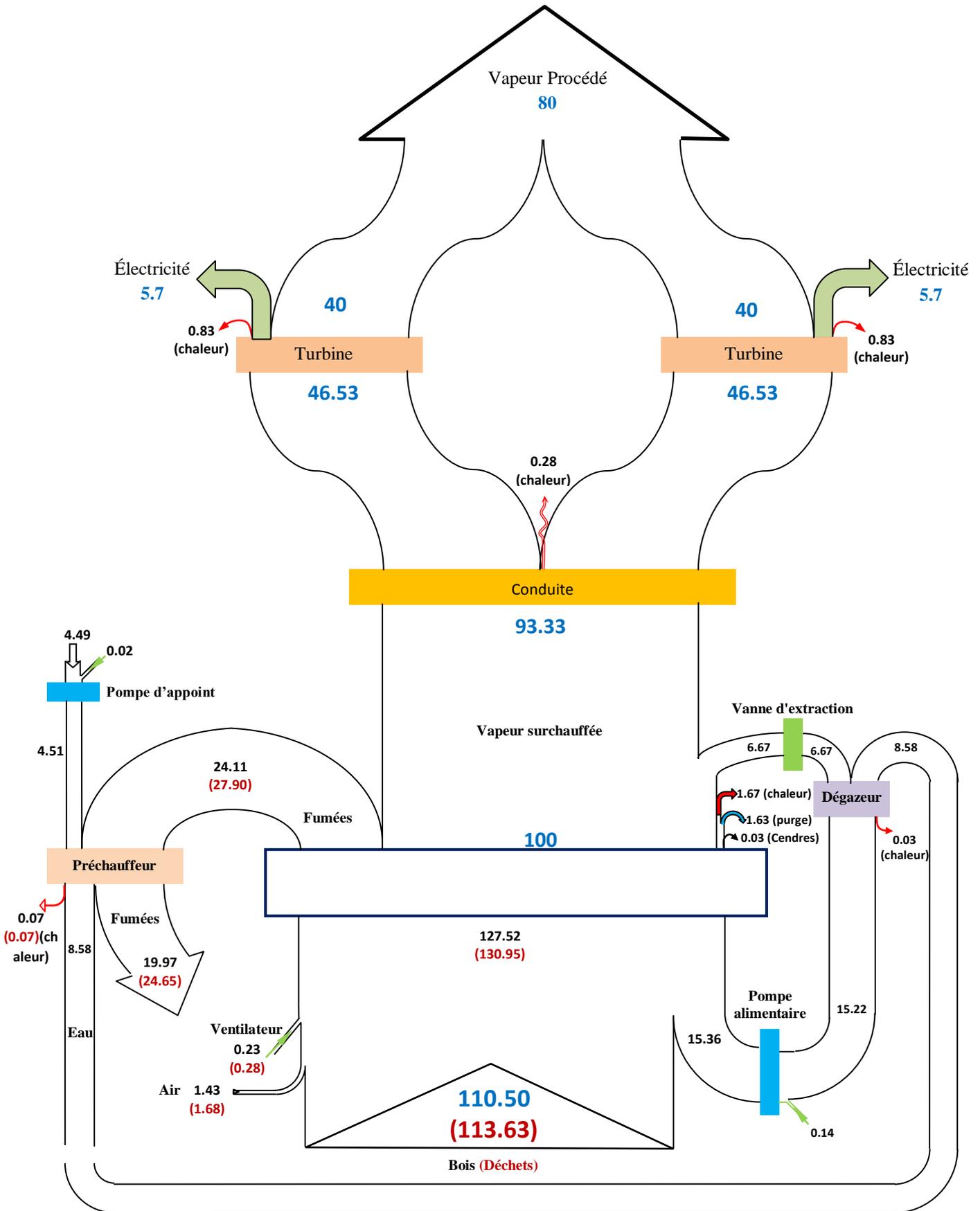


Figure III-3 : Diagramme de Sankay représentant les flux d'énergie à travers l'installation, exprimés en % de l'énergie correspondant au flux de vapeur en sortie de chaudière

# **Chapitre IV:**

## **Analyse exergo-économique**

### I. Introduction :

Nous allons commencer par une analyse exergetique qui fera suite logiquement à l'analyse énergétique précédente. L'analyse exergetique est une approche intéressante pour caractériser de manière appropriée la performance d'un système énergétique. Elle est en relation avec la qualité de l'énergie, elle met en évidence les pertes d'énergie utilisable dans les différents équipements composant un système. Elle permet ainsi de localiser les endroits qui offrent les plus grandes possibilités d'amélioration.

Dans une deuxième partie de ce chapitre nous aborderons l'analyse thermo-économique qui s'appuie sur le concept d'exergie auquel il confère une valeur monétaire. Une telle analyse permet d'évaluer le coût d'un produit d'un système énergétique si l'on connaît les coûts globaux des équipements de l'installation et des flux des combustibles et des matières premières utilisés.

### II. Définition de l'exergie :

L'exergie d'une substance peut être définie comme le travail maximum pouvant être extrait à partir de toute forme d'énergie de cette substance, en l'amenant à son état d'équilibre dans un environnement donné.

Ce concept d'exergie est indissociable d'un état de référence dans lequel la substance se trouverait en équilibre thermique, mécanique et chimique avec le milieu ambiant. Le milieu ambiant lui-même est conçu comme ne présentant en son sein ni gradient de pression, ni gradient de température, ni différence de potentiel chimique, ni exergie cinétique, ni exergie potentielle. Dans ces conditions, il est impossible de pouvoir en extraire un quelconque travail. Certains auteurs ont baptisé un tel état de référence "*état mort*".

Habituellement, c'est l'air atmosphérique définie par une température de référence  $T_0$ , une pression de référence  $P_0$  et une composition de référence homogène donnée, qui constitue le milieu ambiant par rapport auquel sont exécutés les calculs exergetiques.

Dans la présente analyse, nous adoptons l'environnement de référence défini au tableau ci-dessous [7]

**Tableau IV-1** : Environnement de référence pour les calculs exergétiques

Phase gazeuse à $T_0=298\text{ K}$ et $P_0=1\text{ atm}$	
Composant $i$	Pourcentage molaire $Y_i^e$ (%)
N <sub>2</sub>	75,67
O <sub>2</sub>	20,35
H <sub>2</sub> O(g)	3,12
CO <sub>2</sub>	0,03
Autres	0,83

### III. Exergie d'un écoulement de fluide :

Une substance en écoulement peut transporter de l'exergie sous différentes formes : exergie chimique, exergie physique, exergie cinétique et exergie potentielle.

Lors de l'analyse énergétique au chapitre précédant, nous avons négligé partout l'énergie cinétique et l'énergie potentielle des écoulements, nous ferons donc de même ici avec l'exergie cinétique et l'exergie potentielle des écoulements rencontrés dans le système.

**III.1. Exergie physique :** L'exergie physique spécifique d'un fluide en écoulement est donnée par l'expression :

$$\psi_{ph} = (h - T_0s) - (h_0 - T_0s_0) = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (IV.1)$$

Où  $(h)$  et  $(s)$  sont respectivement l'enthalpie spécifique et l'entropie spécifique du fluide à un état défini par une température quelconque  $(T)$  et une pression quelconque  $(P)$  ; tandis que  $(h_0)$  et  $(s_0)$  sont l'enthalpie spécifique et l'entropie spécifique du même fluide à l'état de référence  $(P_0, T_0)$ .

**III.1.1. Exergie physique de la vapeur d'eau :** Dans les calculs exergétiques qui suivront tout au long de ce chapitre, l'exergie des écoulements d'eau et de vapeur d'eau sera exclusivement de nature physique. Pour ces calculs, les enthalpies et les entropies seront obtenues à partir des tables des propriétés thermodynamiques de l'eau.

Tableau IV-2 : Le flux d'exergie en différents points

Point	T (°C)	P (Mpa)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg K)	$\psi_i$ (kJ/kg)	Débit (Kg/s)	$\dot{\psi}_i$ (kw)
1	34,9	0,1	146,5	0,50439	0,68	16,39	11,09
2	35	0,6	147,19	0,50501	1,18	16,39	19,38
3	66	0,6	276,69	0,9054	11,37	16,39	186,28
4	109,5	0,6	459,5	1,4125	43,06	17,50	753,55
5	110	3,5	463,723	1,4156	46,36	17,50	811,29
purge	240		1037,305	2,70146	236,76	0,83	197,30
6	375	3,2	3169,62	6,8	1147,71	16,67	19128,42
6'	375	3,2	3169,62	6,8	1147,71	1,11	1275,23
7	351,9	0,6	3169,62	7,5527	923,40	1,11	1026,00
8	375	3,2	3169,62	6,8	1147,71	15,56	17853,19
9	370	3,1	3159,95	6,799	1138,33	7,78	8853,70
10	120	0,1	2716,57	7,4667	495,98	15,56	7715,22

III.1.2. Exergie physique des fumées : L'exergie physique des fumées est calculée par l'expression suivante :

$$\bar{\psi}_f^{ph} = \sum y_i [(\bar{h}_i - \bar{h}_{0i}) + T_0(\bar{s}_i - \bar{s}_{0i})] \quad (IV.2)$$

Avec :

- $\bar{h}_i$  : L'enthalpie du constituant i à une température T en kJ/kmol
- $\bar{h}_{0i}$  : L'enthalpie du constituant i à 298 K en kJ/kmol
- $\bar{s}_i$  : L'entropie du constituant (i) à une température T des fumées et à sa pression partielle  $y_i P_0$ , en kJ/kmol K
- $\bar{s}_{0i}$  : L'entropie du constituant (i) à 298 K et  $y_i P_0$ , en kJ/kmol.K
- $y_i$  : La fraction molaire du constituant (i) dans les fumées

Détermination de la différence d'enthalpie :

$$\bar{h}_i = \bar{h}_{fi}^0 + (\bar{h}_i - \bar{h}_{i,298K})$$

$$\bar{h}_{0i} = \bar{h}_{fi}^0 + (\bar{h}_{0i} - \bar{h}_{i,298K}) = \bar{h}_{fi}^0 + (0) = \bar{h}_{fi}^0$$

où :  $\bar{h}_{fi}^0$  représente l'enthalpie de formation du constituant (i) à 1atm et 298 K.

$$(\bar{h}_i - \bar{h}_{0i}) = (\bar{h}_i - \bar{h}_{i,298K}) \quad (IV.3)$$

Cette différence d'enthalpie se lit directement sur les tables des propriétés thermodynamiques de l'espèce (i) pour une température donnée des fumées.

Etant donné que les fumées dans notre système sont partout considérées à la pression de référence  $P_0$ ,

**Détermination de la différence d'entropie :**

La différence d'entropie dans l'expression (IV.2) s'exprime ainsi :

$$\bar{s}_i - \bar{s}_{0i} = \bar{s}_i(T_i; y_i P_0) - \bar{s}_{0i}(T_0; y_i P_0)$$

$$\bar{s}_i(T_i; y_i P_0) = \bar{s}_i(T_i; P_0) + [\bar{s}_i(T_i; y_i P_0) - s_i(T_i; P_0)]$$

$$\bar{s}_i(T_i; y_i P_0) = \bar{s}_i(T_i; P_0) - \bar{R} \ln \frac{y_i P_0}{P_0}$$

$\bar{R}$  est la constante universelle des gaz parfaits ( $\bar{R} = 8.3144 \frac{kJ}{kmol.K}$ )

$$\bar{s}_i(T_i; y_i P_0) = \bar{s}_i(T_i; P_0) - \bar{R} \ln y_i$$

$$\bar{s}_{0i}(T_0; y_i P_0) = \bar{s}_{0i}(T_0; P_0) - \bar{R} \ln y_i$$

On obtient donc :

$$\bar{s}_i - \bar{s}_{0i} = [\bar{s}_i(T_i; P_0) - \bar{R} \ln y_i] - [\bar{s}_{0i}(T_0; P_0) - \bar{R} \ln y_i]$$

Ce qui donne finalement :

$$\bar{s}_i - \bar{s}_{0i} = [\bar{s}_i(T_i; P_0) - \bar{s}_{0i}^0(T_0; P_0)] \quad (IV.4)$$

Comme pour la différence d'enthalpie, cette différence d'entropie se lit directement sur les tables des propriétés thermodynamiques de l'espèce (i).

**Remarque :** La vapeur d'eau qui se trouve dans les fumées doit être traitée d'une façon particulière, car à l'état de référence standard, l'eau n'est pas sous forme de vapeur, mais à l'état liquide. Il faudra donc ajouter à la différence d'enthalpie lue pour la vapeur d'eau sur les tables, l'enthalpie de vaporisation ( $h_{fg}$ ) à 25 °C.

Enfin on trouve :

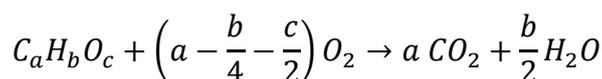
$$\psi_{fi}^{ph} = \sum y_i \left( (\bar{h}_{fi} - \bar{h}_{fi,298}) + T_0 [\bar{s}_i(T_i; P_0) - \bar{s}_{0i}^0(T_0; P_0)] \right) \quad (IV.5)$$

**Tableau IV-3** : Valeurs lues pour les différentes enthalpies et entropies des constituants des fumées aux températures  $T_{f1}$  et  $T_{f2}$  [11]

Eléments		Unité	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	
$h_{fi}^0$		kJ/Kmol	-393520	0	0	-241820 (g) 43996 (l)	
$\bar{h}_{i,298 K}$			9364	8682	8669	9904	
$\bar{S}_{0i}$		kJ/kmol.K	213.685	205.033	191.502	188.72	
Bois	$T_{f1} = 148 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{h}_i$	kJ/Kmol	14248.2	12344.4	12254.3	14043
		$\bar{s}_i$	kJ/kmol.K	227.357	215.312	201.568	200.35
	$T_{f2} = 91 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{h}_i$	kJ/Kmol	11908	10630.2	10587.8	12127.6
		$\bar{s}_i$	kJ/kmol.K	221.386	210.932	197.315	195.453
Déchet	$T_{f1} = 151 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{h}_i$	kJ/Kmol	14374.8	12435.6	12957.5	14181
		$\bar{s}_i$	kJ/kmol.K	227.656	215.527	201.775	204.431
	$T_{f2} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{h}_i$	kJ/Kmol	12269.2	10899	10850.6	12433.3
		$\bar{s}_i$	kJ/kmol.K	222.475	211.662	198.027	196.284

### III.2. Exergie chimique :

L'exergie chimique d'une substance de formule générale  $C_aH_bO_c$  peut être obtenue en considérant la réaction :



On peut poser en effet, d'après le concept d'exergie :

$$\bar{\psi}_F^{ch} = (\bar{h} - T_0 \bar{S})_{Réactifs} - (\bar{h} - T_0 \bar{S})_{Produits} \quad (IV.6)$$

Cette expression peut être développée conformément à la réaction ci-dessus pour donner :

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_F^{ch} = & \left[ \bar{h}_F + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \bar{h}_{O_2} - a \bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] + \\ & - T_0 \left[ \bar{s}_F + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right] \end{aligned} \quad (IV.7)$$

où l'indice (F) se réfère à la substance  $C_aH_bO_c$ . On notant que pour chaque espèce (i) on peut écrire :

$$\bar{s}_i(T_0; y_i^e P_0) = \bar{s}_i(T_0; P_0) - \bar{R} \ln y_i^e$$

L'expression de l'exergie chimique pourrait se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_F^{Ch} = & \left[ \bar{h}_F + \left( a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{h}_{O_2} - a \bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] (T_0; P_0) \\ & - T_0 \left[ \bar{s}_F + \left( a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right] (T_0; P_0) + \bar{R} T_0 \ln \left[ \frac{y_{O_2}^{e(a-\frac{b}{4}-\frac{c}{2})}}{y_{H_2O}^{e\frac{b}{2}} y_{CO_2}^{e^a}} \right] \end{aligned}$$

On peut également écrire cette équation comme suit :

$$\bar{\psi}_F^{Ch} = \left[ \bar{g}_F + \left( a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(g)} \right] (T_0; P_0) + \bar{R} T_0 \ln \left[ \frac{y_{O_2}^{e(a-\frac{b}{4}-\frac{c}{2})}}{y_{H_2O}^{e\frac{b}{2}} y_{CO_2}^{e^a}} \right]$$

Si :  $T_0 = T_{ref}$  alors :  $\bar{g} = \bar{g}_f^0$  et on aura :

$$\bar{\psi}_F^{Ch} = -\Delta \bar{G} + \bar{R} T_0 \ln \left[ \frac{y_{O_2}^{e(a-\frac{b}{4}-\frac{c}{2})}}{y_{H_2O}^{e\frac{b}{2}} y_{CO_2}^{e^a}} \right] \quad (IV.8)$$

#### Application aux constituants des fumées :

1. Eau pure à  $\mathbf{T_0}$  et  $\mathbf{P_0}$  : dans la formule de la substance générique ci-dessus, on peut poser dans ce cas :  $a=0$  ;  $b=2$  ;  $c=1$ . Et l'expression de l'exergie chimique se réduit ainsi dans le cas de l'eau pure à :

$$\bar{\psi}_{H_2O}^{Ch} = [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] (T_0; P_0) + \bar{R} T_0 \ln \left[ \frac{1}{y_{H_2O}^e} \right] \quad (IV.9)$$

1. Dioxyde de carbone pur à  $\mathbf{T_0}$  et  $\mathbf{P_0}$  ;  $a=1$  ;  $b=0$  ;  $c=2$ .

$$\bar{\psi}_{CO_2}^{Ch} = \bar{R} T_0 \ln \left[ \frac{1}{y_{CO_2}^e} \right] \quad (IV.10)$$

Cette dernière expression est valable pour n'importe quel autre gaz qui ne subit pas de réaction chimique, comme l'azote et l'oxygène par exemple.

**III.2.1. Exergie chimique de l'air et des fumées :**

**Exergie chimique d'un mélange de gaz :**

Pour un mélange de gaz parfaits à  $T_0$  et  $P_0$  constitué uniquement de substances présentes sous forme gazeuse dans l'environnement, l'exergie chimique est obtenue en sommant les contributions de tous les constituants du mélange. On a ainsi pour une mole de mélange :

$$\bar{\psi}_{mel}^{ch} = \bar{R}T_0 \sum y_i \ln \frac{y_i}{y_i^e} = \bar{R}T_0 \sum y_i \ln y_i + \bar{R}T_0 \sum y_i \ln \frac{1}{y_i^e} \quad (IV.11)$$

En faisant appel à l'équation (IV.10), cette expression devient :

$$\bar{\psi}_{mel}^{ch} = \sum_i y_i \bar{\psi}_i^{ch} + \bar{R}T_0 \sum y_i \ln y_i \quad (IV.12)$$

**Tableau IV-4 :** Exergie chimique standard de différentes espèces à l'état pur [11]

Espèce	Exergie chimique molaire $\bar{\psi}_i^{ch}$ (kJ/kmol)	Masse molaire M (kg/kmol)	Exergie chimique massique $\psi_i^{ch} = \bar{\psi}_i^{ch}/M$ (kJ/kg)
N <sub>2</sub>	720	28	26
O <sub>2</sub>	3970	32	124
H <sub>2</sub> O(g)	9500	18	528
CO <sub>2</sub>	19870	44	452
SO <sub>2</sub>	313400	64	4897

Pour calculer l'exergie chimique de l'air et des fumées, nous avons besoin des données qui figurent au tableau IV-5 ci-après, extraites des tableaux (II-2 à II-4) présentées au chapitre II.

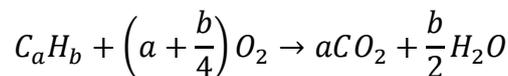
**Tableau IV-5 :** Données relatives aux bois et aux déchets nécessaires pour le calcul de l'exergie chimique de l'air et des fumées dans les deux cas considérés.

		Bois	Déchets
$M_a$	Kg/Kmol	28.97	
$\dot{m}_a$	Kg/s	29.85	35.12
$M_f$	Kg/Kmol	28.9455	28.6366
$\dot{m}_f$	Kg/s	34.59	42.16
<b>La composition molaire de l'air</b>			
$N_2$		0.79	
$O_2$		0.21	
<b>La composition molaire des fumées</b>			
$CO_2$		0.1319	0.1038
$H_2O$		0.1358	0.1307
$SO_2$		0.00004	0.0002
$N_2$		0.6851	0.6972
$O_2$		0.0472	0.0682

En utilisant les données des tableaux IV-4 et IV-5, l'exergie chimique de l'air de combustion du bois et des déchets, ainsi que celle des fumées issues de ces deux combustions, sont calculées à l'aide de l'expression (IV.12). Les résultats de ces calculs sont présentés au tableau IV-7.

### III.2.2. Exergie chimique standard d'un combustible.

L'exergie chimique standard d'un hydrocarbure  $C_aH_b$  dont la combustion complète dans l'oxygène se fait selon la réaction :



est donnée par l'expression suivante (9):

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_F^{ch} = \overline{PCS}(T_0, P_0) - T_0 \left[ \bar{S}_F + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{S}_{O_2} - a\bar{S}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{S}_{H_2O(l)} \right] (T_0, P_0) + a\bar{\psi}_{CO_2}^{ch} \\ + \frac{b}{2} \bar{\psi}_{H_2O(l)}^{ch} - \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{\psi}_{O_2}^{ch} \end{aligned} \quad (IV.13)$$

Cette expression peut également s'écrire sous la forme :

$$\bar{\psi}_F^{ch} = \left[ \bar{g}_F + \left( a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(l)} \right] (T_0, P_0) + a \bar{\psi}_{CO_2}^{ch} + \frac{b}{2} \bar{\psi}_{H_2O(l)}^{ch} - \left( a + \frac{b}{4} \right) \bar{\psi}_{O_2}^{ch}$$

D'une façon générale, pour un combustible quelconque, on peut écrire :

$$\bar{\psi}^{ch} = -\Delta G + \sum_{Produits} n_p \bar{\psi}_p^{ch} - \sum_{Réactifs} n_R \bar{\psi}_R^{ch} \quad (IV.14)$$

où  $\Delta G$  représente la variation d'enthalpie libre de la réaction correspondant à une mole de combustible, les  $n_p$ ,  $n_R$  les nombres de mole des espèces produites et des espèces réactives (autres que le combustible) par mole de combustible, les  $\bar{\psi}_p^{ch}$  et  $\bar{\psi}_R^{ch}$  les exergies chimiques standards des espèces produites et réactives par mole de l'espèce correspondante.

En ce qui nous concerne, nous utilisons des combustibles non conventionnels qui sont le bois et les déchets, combustibles pour lesquels nous ne disposons pas de valeurs standards de l'exergie. C'est pourquoi nous allons utiliser une formule empirique introduite par Szargut [12] :

$$\psi_c^{ch} = \beta_f (PCI + w h_{fg}) + w \psi_{ch,eau}^\circ \quad (IV.15)$$

Avec :

- $\beta_f$  : une constante développée à partir de corrélations statistiques, elle est donnée pour la biomasse par l'expression suivante :

$$\beta_b = 1,0437 + 0,1869 \frac{H}{C} + 0,0617 \frac{O}{C} + 0,0428 \frac{N}{C} \quad (IV.16)$$

- PCI : Pouvoir calorifique inférieur du combustible en kJ/kg
- w : taux massique d'humidité dans le combustible
- $h_{fg}$  : enthalpie de vaporisation de l'eau en kJ/kg
- $\psi_{ch,eau}^\circ$  : exergie spécifique de l'eau à l'état de référence en kJ/kg
- H, O, C, N : pourcentages massiques de l'hydrogène, l'oxygène, le carbone et l'azote respectivement dans le combustible.
- $\dot{m}_c$  : débit massique du combustible en kg/s

- $\psi_c^{ch}$  : pouvoir exergétique du combustible en kJ/kg

Pour calculer l'exergie de nos deux combustibles, on doit pouvoir d'abord calculer la constante  $\beta$  qui dépend de la composition massique du combustible, puis avoir l'exergie chimique standard de l'eau liquide et l'enthalpie de vaporisation de l'eau à la température standard. On doit également disposer de la valeur du PCI du combustible. Toutes ces données sont récapitulées au tableau IV-6 ci-dessous.

**Tableau IV-6:** Données nécessaires au calcul de l'exergie chimique des combustibles

	Bois	Déchets
<b>PCI (kJ/kg)</b>	12362	10805
<b><math>\dot{m}_c</math> (kg/s)</b>	4.72	5.56
<b>Composition massique des combustibles</b>		
<b>Elément</b>	<b>kg i/kg bois</b>	<b>kg i/kg déchets</b>
<b>C</b>	0,4000	0,3161
<b>H</b>	0,0464	0,0407
<b>O</b>	0,3472	0,2343
<b>N</b>	0,0016	0,0093
<b>Cl</b>	0,0002	-
<b>S</b>	0,0004	0,0016
<b>Cendres</b>	0,0042	0,1676
<b>w</b>	0.2000	0.2305
<b>Données concernant l'eau</b>		
<b><math>\psi_{ch,eau}^\circ</math> (kJ/kg)</b>	50	
<b><math>h_{fg}</math> (kJ/kg)</b>	2442.3	

Avec ces données, on utilise l'équation (IV.16) pour calculer les valeurs de la constante  $\beta$  pour les deux combustibles, puis l'expression (IV.15) pour calculer l'exergie de chacun des deux combustibles. Les résultats de ces calculs sont portés, au même titre que ceux concernant l'exergie de l'air et des fumées, au tableau IV- 7 ci-dessous.

**Tableau IV-7:** Exergie du combustible, de l'air de combustion et des fumées issues des deux combustions

	Combustible		Air		f <sub>1</sub>		f <sub>2</sub>	
	Bois	Déchets	Bois	Déchets	Bois (148°C)	Déchets (151°C)	Bois (91°C)	Déchets (100 °C)
$\psi^{ch}$ (KJ/kmol)			129	129	2270.2	1817	2270.2	1817
$\bar{\psi}^{ch}$ (KJ/kg)	14390	12684	4.46	4.46	78.43	63.44	78.43	63.44
$\dot{\psi}^{ch}$ (KW)	67921	70523	133.13	156.4	2713	2675	2713	2675
				$\psi^{ph}$ (KJ/Kmol)	6602	6684	9174	5998
				$\bar{\psi}^{ph}$ (KJ/Kg)	228.1	233.39	213.29	209.443
				$\dot{\psi}^{ph}$ (KW)	7890	9840	7378	8830

**Remarques :** Dans les calculs conduisant aux résultats du tableau ci-dessus, nous avons tenu compte du fait que :

- L'air et le combustible entrent dans la chaudière à l'état standard (25 °C et 1 atm), donc leur exergie physique est nulle, toute leur exergie est par conséquent sous forme chimique.
- En revanche, l'exergie totale des fumées est représentée par la somme de son exergie chimique et de son exergie physique

$$\bar{\psi}_f = \bar{\psi}_f^{ch} + \bar{\psi}_f^{ph} \quad (IV. 17)$$

#### IV. Bilan d'exergie pour un volume de contrôle :

Nous allons à présent appliquer le bilan d'exergie aux différents volumes de contrôle de notre installation. A cet effet, rappelons que dans un volume de contrôle, à l'inverse de l'énergie qui obéit à un principe de conservation, et de l'entropie qui obéit à un principe de croissance, l'exergie obéit à un principe de décroissance. Il y aura donc à travers chacun des volumes de contrôle analysés dans notre système, une certaine destruction d'exergie qui sera calculée à partir d'un bilan d'exergie qui mettra en jeu, non seulement les flux d'exergie accompagnant les écoulements de substances à travers notre volume de contrôle, mais également l'exergie échangée sous forme de puissance et l'exergie perdue qui accompagne les transferts d'énergie sous forme de chaleur vers l'environnement.

Le bilan d'exergie pour chacun des huit volumes de contrôle considérés dans cette analyse (voir figure III-1) s'écrira comme suit :

$$\sum_{i;\text{entrées}} \dot{\psi}_i = \dot{W}_k + \sum_{e;\text{sorties}} \dot{\psi}_e + \dot{\psi}_k^p + \dot{\psi}_k^d \quad (IV.18)$$

Où :

- $\dot{\psi}_i$  : Représente l'exergie amenée dans le volume de contrôle par l'entrée (i);(toujours positive).
- $\dot{W}_k$  : La puissance, positive lorsqu'elle est produite par le système (cas des turbines), négative lorsqu'elle est consommée par le système (cas des pompes et du ventilateur).
- $\dot{\psi}_e$  : L'exergie quittant le volume de contrôle par la sortie (e) ;(toujours positive).
- $\dot{\psi}_k^p$  : L'exergie perdue avec la chaleur dissipée dans le milieu ambiant. Cette exergie sera évaluée en considérant un cycle de Carnot par le biais duquel la chaleur dissipée sera transférée à partir d'une surface de contrôle de température  $T_s$  vers le milieu ambiant, considéré à la température de référence  $T_0$ , elle sera donc donnée par :

$$\dot{\psi}_k^p = |\dot{Q}_k| \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \quad (IV.19)$$

Pour les turbines et la chaudière, nous poserons  $T_s=80$  °C et pour les autres volumes de contrôles, nous poserons  $T_s=50$  °C.

Une fois tous les termes que nous venons de définir sont calculés séparément pour chaque système, le bilan d'exergie nous permettra de calculer l'exergie détruite  $\dot{\psi}_k^d$ , et par la même occasion, nous caractériserons la performance du composant concerné à l'aide d'un rendement exergétique, dont l'expression peut prendre différentes formes selon la nature du composant. D'une façon générale, le rendement exergétique exprimera la performance du système considéré par le rapport de l'exergie que ce système restitue utilement sur celle qui lui sera fournie.

Ces calculs feront l'objet du paragraphe suivant.

## V. Exergie détruite dans chaque système :

Les différents bilans d'exergie pour les volumes de contrôle I à VIII (voir figure III-1) s'établissent comme ci-dessous :

**Système I** : Pompe d'eau d'appoint.

$$\dot{\psi}_1 = \dot{W}_{p1} + \dot{\psi}_2 + \dot{\psi}_I^d$$

$$\dot{\psi}_I^d = (\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2) - \dot{W}_{p1} \quad (IV.20)$$

$$\varepsilon_I = \frac{\dot{\psi}_2}{\dot{\psi}_1 + \dot{W}_{p1}} \quad (IV.21)$$

**Système II** : Préchauffeur d'eau

$$\dot{\psi}_{f1} + \dot{\psi}_2 = \dot{\psi}_{f2} + \dot{\psi}_{II}^p + \dot{\psi}_3 + \dot{\psi}_{II}^d$$

$$\dot{\psi}_{II}^d = (\dot{\psi}_{f1} - \dot{\psi}_{f2}) + (\dot{\psi}_2 - \dot{\psi}_3) - \dot{\psi}_{II}^p \quad (IV.22)$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{\dot{\psi}_3 - \dot{\psi}_2}{\dot{\psi}_{f1} - \dot{\psi}_{f2}} \quad (IV.23)$$

**Système III** : Chaudière

$$\dot{\psi}_5 + \dot{\psi}_c + \dot{\psi}_a = \dot{W}_v + \dot{\psi}_6 + \dot{\psi}_{f1} + \dot{\psi}_p + \dot{\psi}_{III}^p + \dot{\psi}_{III}^d$$

$$\dot{\psi}_{III}^d = (\dot{\psi}_5 - \dot{\psi}_6 - \dot{\psi}_p) + (\dot{\psi}_c + \dot{\psi}_a - \dot{\psi}_{f1}) - \dot{W}_v - \dot{\psi}_{III}^p \quad (IV.24)$$

$$\varepsilon_{III} = \frac{(\dot{\psi}_8 - \dot{\psi}_5) + \dot{\psi}_{f1}}{\dot{\psi}_c + \dot{W}_v} \quad (IV.25)$$

**Système IV** : La vanne d'extraction

$$\dot{\psi}_{6'} = \dot{\psi}_7 + \dot{\psi}_{IV}^d$$

$$\dot{\psi}_{IV}^d = \dot{\psi}_{6'} - \dot{\psi}_7 \quad (IV.26)$$

$$\varepsilon_{IV} = \frac{\dot{\psi}_7}{\dot{\psi}_{6'}} \quad (IV.27)$$

**Système V** : Dégazeur

$$\dot{\psi}_7 + \dot{\psi}_3 = \dot{\psi}_4 + \dot{\psi}_V^p + \dot{\psi}_V^d$$

$$\dot{\psi}_V^d = \dot{\psi}_7 + \dot{\psi}_3 - \dot{\psi}_4 - \dot{\psi}_V^p \quad (IV.28)$$

$$\varepsilon_V = \frac{\dot{\psi}_4}{\dot{\psi}_3 + \dot{\psi}_7} \quad (IV.29)$$

**Système VI** : Pompe alimentaire

$$\dot{\psi}_4 = \dot{W}_{VI} + \dot{\psi}_5 + \dot{\psi}_{VI}^d$$

$$\dot{\psi}_{VI}^d = (\dot{\psi}_4 - \dot{\psi}_5) - \dot{W}_{VI} \quad (IV.30)$$

$$\varepsilon_{VI} = \frac{\dot{\psi}_5}{\dot{\psi}_4 + \dot{W}_{p2}} \quad (IV.31)$$

**Système VII : Conduite**

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_8 &= 2\dot{\psi}_9 + \dot{\psi}_{VII}^p + \dot{\psi}_{VII}^d \\ \dot{\psi}_{VII}^d &= \dot{\psi}_8 - 2\dot{\psi}_9 - \dot{\psi}_{VII}^p \end{aligned} \quad (IV.32)$$

$$\varepsilon_{VII} = \frac{2 \dot{\psi}_9}{\dot{\psi}_8} \quad (IV.33)$$

**Système VIII : Turbine**

Le bilan d'exergie pour chaque turbine s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_9 &= \dot{W}_{VIII} + \frac{\dot{\psi}_{10}}{2} + \dot{\psi}_{VIII}^p + \dot{\psi}_{VIII}^d \\ \dot{\psi}_{VIII}^d &= \dot{\psi}_9 - \frac{\dot{\psi}_{10}}{2} - \dot{W}_{VIII} - \dot{\psi}_{VIII}^p \end{aligned} \quad (IV.34)$$

$$\varepsilon_{VIII} = \frac{\frac{\dot{\psi}_{10}}{2} + \dot{W}_T}{\dot{\psi}_9} \quad (IV.35)$$

**Le rendement de l'installation :**

$$\varepsilon_T = \frac{2 \dot{W}_T + \dot{\psi}_{10} - \dot{W}_{p1} - \dot{W}_{p2} - \dot{W}_v}{\dot{\psi}_c}$$

En rappelant les différentes déperditions de chaleur et les différentes puissances mécaniques mises en jeu dans les bilans d'énergie effectués au chapitre III, et en utilisant les données précédentes du présent chapitre concernant l'exergie calculée pour chacun des flux de matière intervenant sur les différents volumes de contrôle analysés, on procède d'abord au calcul de l'exergie perdue au niveau de chaque système à l'aide de l'expression (IV.19), puis à celui de l'exergie détruite par application du bilan d'exergie correspondant à chaque système. Les résultats principaux de ces calculs sont présentés au tableau IV-8 ci-dessous.

**Tableau IV-8** : Résultats des différents bilans d'exergie

système	$\dot{Q}$ (kW)		$\dot{W}$ (kW)	$\dot{\psi}^p$ (kW)		$\dot{\psi}^d$ (kW)		$\varepsilon$ (%)	
	Bois	Déchets	bois et déchets	Bois	Déchets	Bois	Déchets	Bois	Déchets
<b>I</b>			11.71			3.43		84.94	
<b>II</b>	17.71	35.98		2.87	2.90	343.73	439.94	32.6	16.52
<b>III</b>	923.78	630.93		143.93	98.31	38878.1	39658.9	40.68	41.88
<b>IV</b>						249.23		80.46	
<b>V</b>	15.36			1.19		457.53		62.16	
<b>VI</b>			73.5			54.40		93.42	
<b>VII</b>	150.42			11.64		134.15		99.18	
<b>VIII</b>	448.28			69.85		1923.24		77.45	
<b>Total</b>								19.88	19.12

## VI. Exploitation des résultats de l'analyse exergetique :

Nous allons maintenant exploiter ces résultats pour exprimer et présenter les flux exergetiques aux différents points de l'installation en pourcentage du flux exergetique du combustible. Ces calculs sont regroupés dans le tableau IV-9 ci-dessous.

**Tableau IV-9:** Les flux exergetiques aux différents points de l'installation en pourcentage du flux exergetique du combustible.

point	% $\psi$	
	Bois	Déchets
1	0,02	0,02
2	0,03	0,03
3	0,27	0,26
4	1,11	1,07
5	1,14	1,10
p	0,29	0,28
6	28,16	27,12
6'	1,88	1,81
7	1,51	1,45
8	26,29	25,32
9	13,04	12,55
10	11,36	10,94
a	0,20	0,19
f1	15,61	17,60
f2	15,30	16,31
Puissance	4,42	4,25
c	100	100
$W_v$ (ventilateur)	0.18	0.21

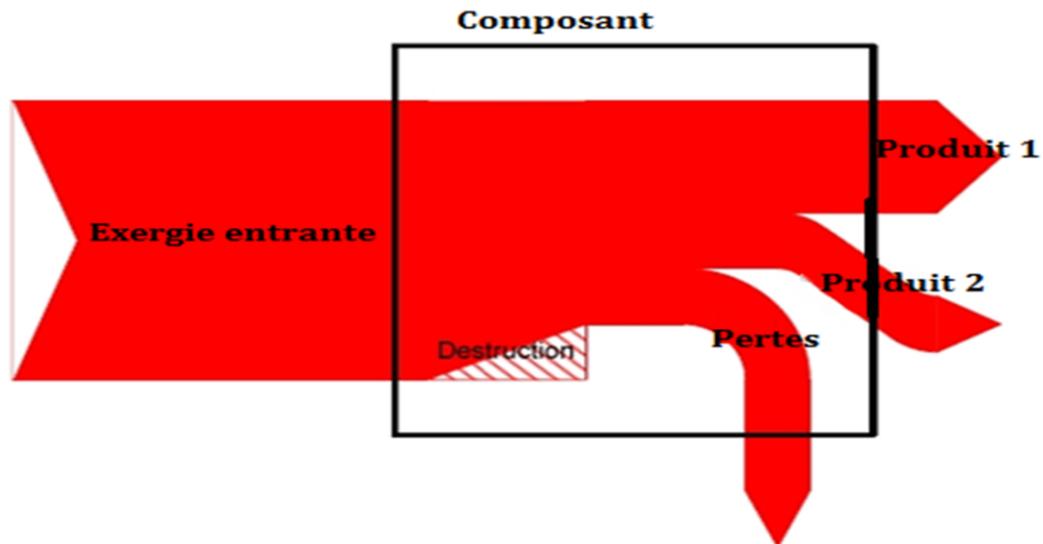
Dans le tableau IV-10 ci-après, nous présentons également an % du flux exergetique du combustible, les flux exergetique consommés, perdus et détruite au niveau des différents composants. Nous y avons également ajouté la somme des flux perdu et détruit au niveau de chaque composant.

**Tableau IV-10:** Pourcentage du flux exergetique du combustible, les flux exergetique consommés, perdus et détruite au niveau des différents composants

	% $\dot{W}$		% $\dot{\psi}^P$		% $\dot{\psi}^d$	
	Bois	Déchets	Bois	Déchets	Bois	Déchets
I	0,017	0,017			0,005	0,005
II			0,004	0,004	0,506	0,622
III			0,212	0,139	57,240	56,235
IV					0,367	0,353
V			0,002	0,002	0,674	0,649
VI	0,108	0,104			0,080	0,077
VII			0,017	0,017	0,198	0,190
VIII	1 Turbine		0,103	0,099	2,832	2,727
	2 Turbines		0,206	0,198	5,664	5,455

**Diagramme de Grassmann**

La représentation des différents flux d'exergie à travers un composant donne lieu au « diagramme de Grassmann » .



**Figure IV-1 :** Diagramme de Grassmann

Avec les données ci dessus, nous pouvons tracer le diagramme de Grassmann pour notre installation (figure IV-2)



En exploitant les résultats obtenus lors de l'analyse exergetique, nous avons dans un premier temps calculé pour chaque composant l'exergie perdue associée à la chaleur dissipé dans le milieu ambiant, ensuite nous lui avons appliqué le bilan d'exergie et calculé la destruction d'exergie au niveau de chaque volume de contrôle. Les résultats de ces calculs sont regroupés au tableau IV-10 en % d'exergie primaire fournie au système avec le combustible. Nous remarquons que la destruction d'exergie la plus importante se produit au niveau de la chaudière, elle est en effet de 57.45 % pour le bois et 56.38 % pour les déchets. Cette destruction est due environ pour moitié au processus de combustion qui est un phénomène hautement irréversible, et pour moitié aux transferts de chaleur dans les échangeurs où les différences de température sont très élevées, notamment les écrans d'eau, le surchauffeur, l'évaporateur et à un degré moindre l'économiseur. Si le rendement exergetique est, à l'opposé du rendement énergétique plus grand pour la chaudière à déchet, c'est parce que les niveaux de températures dans cette dernière sont légèrement plus petits que dans la chaudière à bois (voir projet de master).

Quant au rendement exergetique de la cogénération, il est de 19.88 % pour le bois et de 19.12 % pour les déchets. La tendance s'inverse donc à ce niveau et le rendement exergetique de la cogénération devient plus grand pour le bois, preuve que, comme il a été noté dans la partie "analyse énergétique", l'énergie est mieux utilisée dans le système quand le bois est utilisé comme combustible. En effet, en dehors de la chaudière, les pertes dues aux dissipations ( $\dot{\psi}^p$ ) et celles dues aux destructions ( $\dot{\psi}^d$ ) cumulées sont de (7.72%) pour le bois et (7.75%) pour les déchets, mais la perte d'exergie à la cheminée ( $\dot{\psi}_{f_2}$ ) est largement plus importante dans le cas des déchets (16.31% devant 14.86% seulement pour le bois).

Nous avons noté dans l'analyse énergétique que le rapport énergétique des produits cogénérés (électricité/chaleur) n'est que de 0.16. A présent nous pouvons observer que le rapport exergetique de ces mêmes produits est nettement plus important soit ( $9.56/11.36=0.84$ ) pour le bois et ( $8.74/10.94 = 0.79$ ) pour les déchets.

## VII. Analyse thermo économique

### VII.1. Introduction

L'analyse exergetique nous a donné des éléments pour évaluer la performance des composants. En effet, celle-ci est traduite par des indicateurs tels que le rendement et les taux de destruction d'exergie au niveau des divers composants de l'installation. L'analyse

exergétique nous a permis également de localiser et de quantifier les pertes d'exergie dues aux dissipations d'énergie sous forme de chaleur dans le milieu ambiant.

L'analyse thermo-économique traduit les irréversibilités d'un système en termes de coûts monétaires. Comme l'analyse exergétique, elle permet une meilleure compréhension des circonstances de fonctionnement et l'identification des gisements d'améliorations possibles. En outre, elle a l'avantage de pouvoir rendre possible la détermination des coûts réels des différents produits d'une installation, compte tenu des coûts des matières premières et des équipements.

A chaque composant seront associés trois types de flux monétaires : les flux monétaires entrants, le flux monétaire relatif à l'investissement et à la maintenance du composant, les flux monétaires des produits.

Le bilan des coûts consiste à établir une égalité entre les coûts des flux produits d'une part, et les coûts d'investissement du composant d'autre part.

Le coût d'un composant comprend son coût d'acquisition et son coût opératoire et de maintenance, il est donc fixe, indépendant des quantités d'exergie qui transitent à travers lui. Ce coût est calculé comme suit [13]:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{CI} + \dot{Z}_{OM} \quad (IV.1)$$

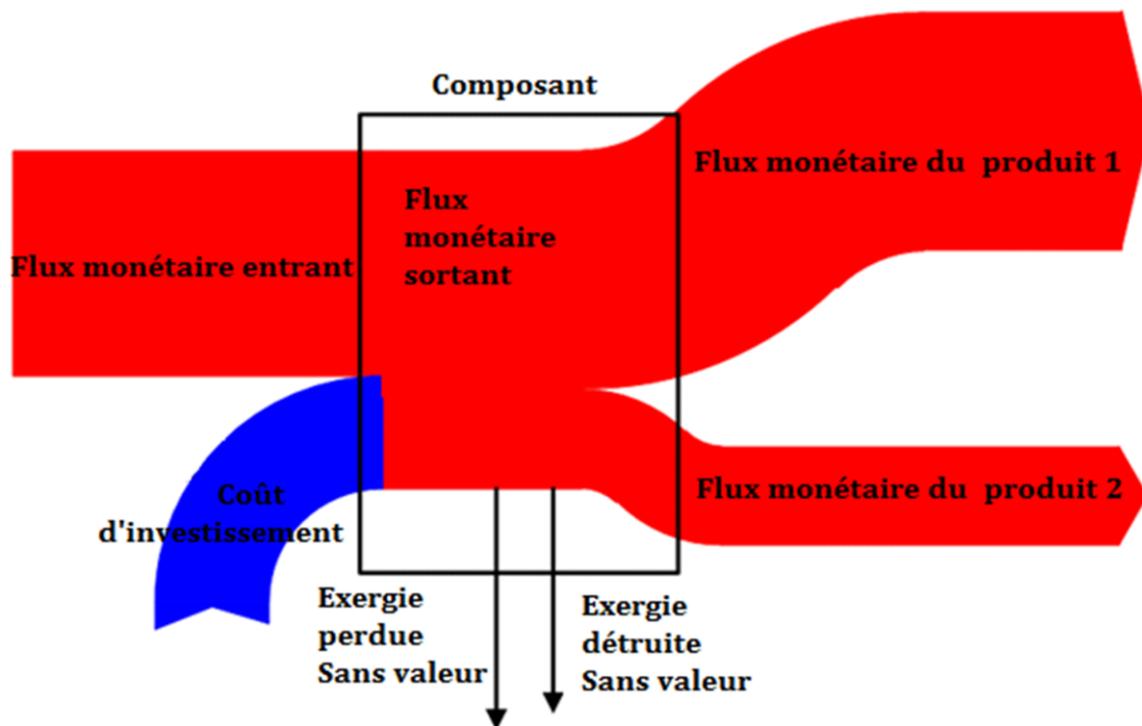
Où :  $\dot{Z}$  représente le coût fixe (DA/h)

Et les indices : (CI) pour Capital Investi et (OM) pour Opératoire et Maintenance.

Le coût unitaire de l'exergie est important pour l'étude de performance des composants. Chaque Kilowattheure d'exergie entrant ou quittant le composant véhicule un coût (où a une valeur), pouvant être comparé au coût de l'exergie électrique. L'anergie, au même titre que l'exergie perdue et l'exergie détruite, ne sont dotées d'aucune valeur.

Le bilan des coûts peut s'écrire pour un composant (k) [13]:

$$\sum_{\text{sorties}} \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{W,k} = \dot{C}_{Q,k} + \sum_{\text{entrées}} \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (IV.2)$$



**Figure IV-3:** Diagramme des flux monétaires à travers un composant

Le flux monétaire est le produit du coût unitaire de l'exergie par le flux d'exergie [11]:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{\psi}_i : \text{Flux monétaire entrant}$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{\psi}_e : \text{Flux monétaire sortant (produit)}$$

$$\dot{C}_W = c_W \cdot \dot{W} : \text{Coût de la puissance}$$

$$\dot{C}_Q = c_Q \cdot \dot{\psi}_Q : \text{Coût de la chaleur}$$

tels que :

$c$  : coût unitaire de l'exergie (DA/KWh)

$\dot{C}$  : coût horaire de l'exergie (DA/h)

Les indices (i) et (e) désignent entrée et sortie respectivement.

En considérant les équations ci-dessus, l'équation (V.2) devient :

$$\left( \sum_{e:\text{sorties}} c_e \cdot \dot{\psi}_e \right)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{\psi}_{Q,k} + \left( \sum_{i:\text{entrées}} c_i \cdot \dot{\psi}_i \right)_k + \dot{Z}_k \quad (IV.3)$$

Ce bilan nous permet d'obtenir le coût unitaire des produits du composant (k) si l'on connaît ceux des produits des composants définis en amont du composant (k) dans la chaîne de conversion.

Les flux entrants peuvent être des matières premières lorsque le composant (k) occupe le début d'une chaîne par exemple, de l'énergie primaire (cas d'un combustible) ou encore un flux provenant d'un autre composant, donc ayant subi une certaine transformation. Pour utiliser l'équation (V.4) afin d'obtenir le coût d'un produit, il est nécessaire de connaître au préalable les coûts des différents flux entrants.

Ainsi dans le cas présent, il faudra disposer au moins du coût de l'exergie du bois, du déchet, des chaudières et leurs auxiliaires et des turbines, pour pouvoir évaluer les coûts unitaires des deux produits de notre installation qui sont : le kilowattheure électrique et le kilowattheure vapeur, puis les comparer aux coûts courants afin d'évaluer la performance économique de notre installation

## VIII. Conclusion :

N'ayant pas pu former les coûts des équipements des chaudières et leurs auxiliaires et n'ayant pas trouvé le moyen d'évaluer le coût du déchet rendu à l'installation nous ne pouvons donc pas mener jusqu'à son terme cette dernière étape de l'évaluation thermoéconomique de la vapeur fournie au procédé et de l'électricité produite par nos deux turbines. Néanmoins, nous estimons avoir posé les jalons pour d'autre analyse qui pourraient disposer du temps nécessaire pour reconstituer élément par élément les coûts nécessaires à l'exécution du bilan monétaire d'une installation pour évaluer le coût de son produit.

# **Conclusion générale**

### **Conclusion générale :**

Très répandue dans certains pays d'Europe et d'Amérique du nord, notamment, la cogénération n'a pas encore fait son apparition en Algérie. Nous espérons que la sortie du décret exécutif qui fixe les modalités de son introduction en février 2015, comme moyen de conversion d'énergie décentralisé et particulièrement flexible, permettra la valorisation de ressources jusque-là non envisagées sérieusement dans notre pays.

Dans notre étude, nous avons justement analysé le comportement énergétique et exergetique d'une installation qui doit répondre aux besoins thermiques finaux d'un procédé industriel-type (sucrierie, papeterie,...). Ces besoins n'étant pas trop exigeants en intensité énergétique, autrement dit se situant à un niveau exergetique assez bas (1 bar, 120°C), nous avons pu les satisfaire avec un combustible alternatif, le bois ou les déchets ménagers. Cependant, même avec des combustibles aussi pauvres, les températures de chaudière sont suffisamment élevées pour nous tenter d'insérer un moteur (dans notre cas une turbine à vapeur à contre-pression), dans la ligne de transfert de vapeur, entre la chaudière et le procédé, pour tirer avantage de cette intensité énergétique disponible et produire de la puissance. Et il se trouve que le potentiel de l'installation en la matière, non seulement pourrait satisfaire les besoins en électricité du procédé, mais également en vendre autant au réseau.

L'étude a montré que les conditions d'utilisation de l'énergie issue de la combustion du bois ou de celle des déchets, sont satisfaisantes, avec des rendements énergétiques de cogénération de 68.06% dans le cas du bois et de 65.64% dans le cas des déchets. Ces rendements, même s'ils sont un cran en-dessous de ceux réalisables en cogénération avec du gaz naturel, ne sont pas moins comparables avec ceux que la littérature cite pour ce type d'installations alimentées à la biomasse.

L'analyse exergetique, menée comme une étape préalable à une analyse exergo-économique dont l'objectif est d'évaluer le coût unitaire du kilowattheure cogénééré, a clairement montré que, même si la capacité de générer un produit énergétique utilisable à partir des combustibles utilisés, est entamée pour près de 60% au niveau de la chaudière, il n'en reste pas moins à la sortie pour répondre aux exigences du problème qui ne représentent que 19.88% du pouvoir exergetique du bois et 19.12% de celui des déchets. Nous avons cependant pu mesurer toute la difficulté qu'il y a encore à rassembler toutes les informations

## Conclusion générale

---

nécessaires pour être capable d'effectuer une évaluation économique sérieuse de ces opérations.

Dans notre pays, si les déchets sont très sérieusement envisageables comme source d'énergie pour alimenter des unités industrielles de l'envergure de celle dont nous venons de faire l'étude, les éléments que nous avons pu recueillir sur le potentiel en bois dans notre pays, même si nous n'en disposons d'aucune évaluation suffisamment précise, semblent le destiner pour des applications de plus petites capacités classées dans la catégorie de la micro-cogénération.

## Références bibliographiques :

- [1]. **GAZIERE, Association Suisse de l'industrie.** *Production décentralisée d'énergie au moyen d'installations de couplage chaleur-force. Électricité et chaleur* . Suisse : V3E Verband Effiziente Energie Erzeugung, 2011.
- [2]. **RENAUD, Gicquel.** *Systèmes énergétiques "Applications 'classifique".tome 2.* Paris : s.n., 2009.
- [3]. **FLIN, David.** *Cogeneration a user's guide.* s.l. : The institution of Engineering and Technology, 2010.
- [4]. **Project, CODE2.** Cogénération-La décision astucieuse! *WWW.code2-project.eu.* [En ligne] Juillet 2014. [Citation : 17 Mai 2012.] <http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/how-to-French.pdf>.
- [5]. **SNFS.** La consommation d'énergie primaire des sucreries en campagne. *www.snfs.fr.* [En ligne] [Citation : 17 Mars 2015.] <http://www.snfs.fr/site/images/pdf/Consommation%20denergie.pdf>.
- [6]. **Dynamics, Institute for Thermal Turbomachinery and Machine.** *energytech.at – Cogeneration (CHP), a TechnologyPortrait.* Vienna : s.n., Mai 2002.
- [7]. **SHAPIRO, MICHAEL J MORAN & HOWARD N.** *Fundamentals oh engineering thermodynamics* . America : Wiley, 2011.
- [8]. **HAMDI, Amel.** Dimensionnement thermique d'une chaudière à bois pour la production de 60 t/h de vapeur surchauffée à 375 °C et 32 bars. Mémoire de Master -Ecole Nationale Polytechnique - .Alger. 2015.
- [9]. **RAHAL, Narimane.** Dimensionnement thermique d'une chaudière à déchets pour la production de 60 t/h de vapeur surchauffée à 375 °C et 32 bars. Mémoire de Master -Ecole Nationale Polytechnique - .Alger. 2015.
- [10]. **DEKKER, Marcel.** *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators.* Abilene,Texas,USA : s.n., 2003.
- [11]. **SHAPIRO, Michael J MARAN & Howard N.** *Fundamentals of engineering thermodynamics.* America : Wiley, 2011.

[12]. **MEHMOOD, Shoib.** ENERGY AND EXERGY ANALYSES OF BIOMASS CO-FIRING BASED PULVERIZED COAL POWER GENERATION. *A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science.* Ontario : s.n., 13 Avril 2011.

[13]. **Dr PALL ,Valdimarsson.** Basic concepts of thermo economics. United Nations University-geothermal training programme. university of Iceland.