

N⁰ d'ordre : 14/2014-M/G.P

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Faculté de Génie Mécanique & Génie des Procédés



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MAGISTER**

En : **GENIE DES PROCEDES**

Spécialité : Génie des Procédés Industriels

Par: HIMRI Safia

Sujet

*Etude thermodynamique des dégradations
d'énergie dans un procédé de l'industrie
Agro-alimentaire*

Soutenu publiquement, le 17/12/2014, devant le jury composé de :

Mme. A.BENMAILI	Professeur à l'U.S.T.H.B	Présidente
Mr. A. AZZI	Professeur à l'U.S.T.H.B	Examineur
Mr. A.LACHMET	Professeur à l'U.S.T.H.B	Examineur
Mr. D.TOUIL	Professeur à l'U.S.D. Blida	Examineur
Mr. S.BELAADI	Professeur à l'U.S.T.H.B	Directeur de mémoire
Mr. T.FERANI	Ingénieur à l'E.P.B.R Reghaia	Invité

À ma mère

À mon oncle, À ma tante

À mon mari

À mes sœurs

À la mémoire de mon frère Soufiene

À tous mes amis (es) de l'U.S.T.H.B

Je dédie ce travail

Remerciements

Au terme de ce présent travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur Pr. S. BELAADI pour m'avoir proposé et dirigé ce mémoire de magistère ; je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour son aide précieuse qu'il m'a apporté, pour sa patience et ses encouragements. Les précieux conseils qu'il m'a prodigué, la confiance qu'il m'a témoigné ont été déterminants dans la réalisation de ce travail de recherche, qu'il soit assuré de ma sincère reconnaissance.

Mes vifs remerciements vont également à :

- A. BENSMAILI, Professeur à L'USTHB pour l'honneur qu'elle me fait de présider ce jury.

- D. TOUIL, Professeur à L'USDB pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté d'examiner cette présente étude.

- A. AZZI, Professeur à L'USTHB pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté d'examiner cette présente contribution.

- A. LACHEMET, Professeur à L'USTHB pour l'honneur qu'il me fait de faire partie de ce jury

Je tiens également à témoigner mes vifs remerciements à Mr. T. FERRANI Chef de production à L'EPBR pour avoir accepté d'assister à cette soutenance et pour sa contribution à l'aboutissement de ce mémoire.

Que les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire par leur collaboration, leurs conseils, leur soutien moral ou leur amitié trouve ci-joint l'expression de mes sincères remerciements et gratitude. Je remercie

particulièrement Mr Walid BERABOU du LPDT et Khaled de L'EPBR pour leur aide.

En guise de reconnaissances, mes vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de l'équipe de recherche dériégée par le Pr.S. BELAADI du laboratoire du Génie de la Réaction.

SOMMAIRE

<i>Introduction générale</i>	01
CHAPITRE I	
PRESENTATION DE LA CHAÎNE DE PRODUCTION D'UNE BOISSON	
INTRODUCTION	03
I.1. MALTAGE	03
I.2. TECHNOLOGIE DE FABRICATION	04
I.3. BROUAG	07
<i>I.3.1. Contrôle de la mouture</i>	<i>08</i>
<i>I.3.2. Différents types de broyeurs</i>	<i>08</i>
<i>I.3.3. Fonctionnement du broyeur à 3 passages (à 5 cylindres)</i>	<i>09</i>
I.4. BRASSAGE	12
<i>I.4.1. Technologie du brassage</i>	<i>12</i>
<i>I.4.2. Méthodes par décoction</i>	<i>12</i>
<i>I.4.3. Transformations biochimiques</i>	<i>13</i>
<i>I.4.3.1. Matières glucidiques</i>	<i>13</i>
<i>I.4.3.2. Matières azotées</i>	<i>15</i>
<i>I.4.3.3. Hemicelluloses et β-glucanes</i>	<i>16</i>
<i>I.4.3.4. Phosphates organiques</i>	<i>16</i>
<i>I.4.3.5. Acidification au brassage</i>	<i>16</i>
I.5. TECHNIQUE DE BRASSAGE	17
<i>I.5.1. Description du brassage</i>	<i>17</i>
I.6. FILTRATION DE LA MAISCHE	19
I.7. CUISSON (traitement du moût)	20
<i>I.7.1. Aspect chimique du houblon</i>	<i>22</i>
<i>I.7.2. Houblonnage</i>	<i>23</i>
<i>I.7.3. Composition du moût</i>	<i>24</i>
<i>I.7.3.1. Hydrate de carbone</i>	<i>24</i>
<i>I.7.3.2. Matières azotées</i>	<i>24</i>
<i>I.7.3.3. Les lipides</i>	<i>25</i>
<i>I.7.3.4. Autres constituants</i>	<i>25</i>
<i>I.7.4. Contrôle qualité</i>	<i>26</i>

<i>1.8. CLARIFICATION DU MOUT</i>	27
<i>1.9. REFROIDISSEMENT DU MOUT</i>	27
<i>1.10. LA GARDE</i>	27
<i>1.11. LA FILTRATION</i>	28
<i>1.12. CONSERVATION ET CONDITIONNEMENT</i>	28

CHAPITRE II

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'APPROCHE EXERGETIQUE

<i>INTRODUCTION</i>	29
<i>II.1. L'ANALYSE ENTROPIQUE</i>	29
<i>II.1.1. Objet de l'analyse Entropique</i>	29
<i>II.1.2. Méthode</i>	29
<i>II.2. L'ENERGIE</i>	30
<i>II.2.1. Qualité de l'énergie et coût de son utilisation</i>	30
<i>II.2.2. Mesure qualitative des dégradations d'énergies</i>	30
<i>II.2.3. Mesure quantitative des dégradations d'énergies</i>	31
<i>II.2.4. Energie mécanique, électrique ou thermique</i>	32
<i>II.2.5. Energie calorifique</i>	32
<i>II.2.6 Types de dégradations</i>	33
<i>II.3. BILAN ENTROPIQUE</i>	33
<i>II.4. LIEUX DE DEGRADATION D'ENERGIE</i>	34
<i>II.4.1. A l'intérieur des surfaces fermées</i>	34
<i>II.4.2. A l'extérieur des surfaces fermées</i>	34
<i>II.5. DEGRADATION D'ENERGIE A L'INTERIEUR D'UNE SURFACE FERMEE</i>	35
<i>II.5.1. Bilan énergétique et exergie</i>	35
<i>II.6. DEGRADATION D'ENERGIE A L'EXTERIEUR D'UNE SURFACE FERMEE</i>	36
<i>II.7. CONSERVATION DE L'ENERGIE DANS LES SYSTEMES OUVERTS</i>	36
<i>II.7.1. Système ouvert</i>	36
<i>II.7.2. Bilan énergétique d'un système ouvert en régime permanent</i>	37
<i>II.7.3. Insuffisance du bilan énergétique</i>	38
<i>II.8. BILAN ENTROPIQUE D'UN SYSTEME OUVERT</i>	38
<i>II.8.1. Entropie d'un système fermé</i>	38
<i>II.8.2. Rendement d'une machine motrice à deux sources de chaleur</i>	40

II.8.3. Production d'entropie dans un système ouvert	41
II.8.4. Réversibilité et Irréversibilité	42
II.9. ANALYSE EXERGETIQUE DES SYSTEMES OUVERTS EN REGIME PERMANANT	45
II.9.1. Théorème de Gouy-Stodola et travail dégradé	45
II.9.2. Exergie	46
II.9.3. Différentes formes d'exergie	47
II.9.3.1. Exergie cinétique et potentielle	47
II.9.3.2. Exergie physique	47
II.9.3.3. Exergie chimique	48
II.9.4. Bilan d'exergie d'un système ouvert en régime permanent	50
II.10. PERTES EXERGETIQUES D'UN PROCÉDE INDUSTRIEL	51
II.10.1. Perte interne d'exergie	52
II.10.2. Perte externe d'exergie	53
II.10.3. Efficacité exergetique	53
II.11. ANALYSE DES TRAVAUX RELATIFS A L'APPROCHE EXERGETIQUE DES PROCÉDES	53
II.11.1. Echangeur de chaleur	54
II.11.2. Réacteur chimique	55
CONCLUSION	57

CHAPITRE III

BILAN MASSIQUE: CHAUDIERE A VAPEUR- CUVÉ MATIERE – CUVÉ EBULLITION

III. 1. COMBUSTIBLE	59
III. 2. POUVOIR COMBURIVOR	60
III. 3. AIR THEORIQUE	61
III. 4. POUVOIR FUMIGENE	62
III.5. LES BILANS MASSIQUES	63
III.5.1. Le bilan matière de la cuve matière	63
III.5.2. Le bilan matière de la cuve d'ébullition	65
III.5.3. Le bilan matière de la chaudière	67

CHAPITRE IV

BILAN ENERGETIQUE:

CHAUDIÈRE A VAPEUR-CUVÉ MATIERE – CUVÉ EBULLITION

<i>INTRODUCTION</i>	69
<i>IV.1. RESULTATS ET DISCUSSION</i>	70
<i>IV.1.1. Analyse sur la chaudière</i>	70
<i>IV.1.2. Utilisation d'énergie de la chambre de combustion</i>	71
<i>IV.1.3. La destruction d'exergie dans la chambre de combustion</i>	71
<i>IV.1.4. Utilisation de l'énergie dans l'échangeur de chaleur</i>	72
<i>IV.1.5. La destruction d'exergie dans l'échangeur de chaleur</i>	72
<i>IV.2. ANALYSE SUR LA CUVE DE MATIERE</i>	75
<i>IV.2.1. Le bilan énergétique</i>	75
<i>IV.2.2. Le bilan exergétique</i>	76
<i>IV.3. ANALYSE SUR LA CUVE D'EBULLITION</i>	77
<i>IV.3.1. Le bilan énergétique</i>	77
<i>IV.3.2. Le bilan exergétique</i>	78
<i>Conclusion générale</i>	80
<i>Références bibliographiques</i>	81
<i>Annexe</i>	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Etapes de fabrication de malt.

Figure I.2: Etape de fabrication d'une boisson de malt.

Figure I.3: Procédés de fabrication de boisson à base de malt d'orge des ateliers de broyage et de brassage

Figure I.4: Schéma simplifié d'un broyeur à 5 cylindres

Figure I.5: Broyeur à 5 cylindres

Figure I.6: Voies d'hydrolyse des grains d'amidon [10].

Figure I.7: Courbe de brassage par décoction

Figure I.8: Houblon sous forme des pellets.

Figure I.9: Composition de l'extrait au brassage [10].

Figure II.1: Formes de récupération de travail [11].

Figure II.2: Schéma du travail maximal récupérable entre T_2 et T_1 [11].

Figure II.3 : Bilan énergétique d'un système ouvert [12].

Figure II.4 : Création d'entropie par frottement de deux disques [12].

Figure II.5: Schéma d'une machine motrice à deux sources de chaleur [12].

Figure II.6: Bilan entropique du système ouvert [12].

Figure II.7: Création d'entropie par homogénéisation de deux fluides [12].

Figure II.8: Création d'entropie due à la perte de charge de l'écoulement d'un fluide [12].

Figure II.9: Création d'entropie d'une réaction chimique [12].

Figure II.10: Travail maximal d'un processus physique réversible (Kotas, 1985)

Figure II.11: Réaction chimique réversible à (T_0, P_0) (Kotas, 1985)

Figure II.12: Bilan exergétique du système ouvert [12].

Figure II.13: Perte exergétique d'un procédé industriel [12].

Figure II.14: Configuration de réduction des irréversibilités thermodynamiques des réactions chimiques [30].

Figure III.1: Bilan massique de la cuve matière.

Figure III.2: Cuve de matière.

Figure III.3: Bilan massique de la cuve d'ébullition

Figure III.4: Cuve d'ébullition

Figure III.5: Bilan massique de la chaudière.

Figure III.6: Chaudière à vapeur

Figure IV.1: Equilibre thermique typique d'une chaudière

Figure IV.2: Bilan massique et énergétique de la chaudière, de l'échangeur de chaleur et la chaudière.

Figure IV.3: Bilan massique et énergétique de la cuve matière.

Figure IV.4: Bilan massique et énergétique de la cuve d'ébullition

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: La composition chimique de l'amidon.

Tableau II.1 : composition de référence de l'air

Tableau III.1:Composition du gaz naturel (%en volume).

Tableau III.2:Volumes des gaz de combustion.

Tableau III.3: Volumes des fumées à la sortie de la chaudière.

Tableau III.4:Volume d'air nécessaire à la combustion.

Tableau III.5: Calcul des fumées de combustion.

Tableau IV.1: Résultats concernant l'enthalpie et l'entropie au niveau de la chaudière

Tableau IV.2: Analyse énergétique et exergétique pour la chambre de combustion l'échangeur de chaleur et la chaudière.

Tableau IV.3: L'efficacité énergétique et exergétique pour la chambre de combustion, l'échangeur de chaleur et la chaudière.

Tableau IV.4: Résultats concernant l'enthalpie et l'entropie au niveau de la cuve de matière

Tableau IV.5: Résultats concernant l'enthalpie et l'entropie au niveau de la cuve d'ébullition

Nomenclature :

Lettre alphabétique

<i>m</i> : masse	kg
<i>ṁ</i> : flux de masse	kg.s ⁻¹
<i>C_p</i> : capacité calorifique à <i>p</i> constant	kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹
<i>T</i> : température	K
<i>T₀</i> : température de référence	K
Pression :	bar
<i>h</i> : enthalpie :	kJ.kg ⁻¹
<i>s</i> : entropie	kJ.kg ⁻¹ .K
<i>E</i> : énergie	kJ.s ⁻¹
<i>W</i> : énergie mécanique	kJ.s ⁻¹
<i>Q̇</i> : chaleur	kJ.s ⁻¹
<i>E_X</i> : exergie	kJ.s ⁻¹
<i>E_{Xd}</i> : exergie détruite	kJ.s ⁻¹
<i>η</i> : efficacité énergétique	nombre adimensionnel
<i>ψ</i> : efficacité exergétique	nombre adimensionnel

Indices

<i>V</i> : vapeur
<i>d</i> : dégradé
<i>r</i> : récupérable
<i>p</i> : perdu
<i>d</i> : détruite
<i>C</i> : chaudière
<i>CC</i> : chambre de combustion
<i>EC</i> : échangeur de chaleur
<i>vc</i> : vapeur de chauffage
<i>ea</i> : eau d'alimentation
<i>ec</i> : eau condensée
<i>Ch</i> : chimique
<i>Ph</i> : physique
<i>p</i> : potentielle

c: cinétique

f: combustible

a :air

p : produits chauds

α :Coefficient d'excès d'air

pm : malt empaté

M : maïsche

me : moût entré

ms : moût sorti

Cte : constante

Résumé

Le travail consiste en une analyse exergetique de trois parties d'un procédé de fabrication d'une boisson à base de malt. Le concept utile de l'énergie et de l'exergie est analysé, et appliqué au système de chauffage (chaudière), et au système de cuisson (cuve de matière, cuve d'ébullition).

La performance de chaque système est évaluée en utilisant des efficacités basées sur les deux premières lois de la thermodynamique. On a pu ainsi établir les efficacités pour les trois organes principaux de la chaîne: Les efficacités énergétiques et exergetiques de la chaudière, cuve de matière et cuve d'ébullition s'avèrent: (86%, 25,63%, 32,05%) et (34%, 13,42%, 19, 53%), respectivement. On a constaté que la chambre de combustion est l'acteur principal pour la destruction d'exergie suivi par l'échangeur de chaleur. L'optimisation des deux cuves de matière et d'ébullition est difficile, car les énergies consommées sont irréversibles, en raison de l'utilisation de ces dernières dans le procès de cuisson de la matière ou bien du moût. Par contre, plusieurs mesures d'économie doivent être appliquées pour réduire les pertes d'énergie dans la chaudière telles que: la récupération de la chaleur des fumées pour le chauffage de l'air de combustion ou bien le chauffage de l'eau de procès à l'aide des échangeurs de chaleur, la réutilisation des eaux chaudes condensées pour l'alimentation de la chaudière ou bien pour le nettoyage des matériels.

Mots clés : Energie, Exergie, Dégradation.

Abstract

This work consists of an exergetic analysis of three parts in a manufacturing process of malt drink. The useful concept of energy and exergy utilization is analyzed, and applied to the heating system (boiler), and to the system of cooking (matter tank, boiling tank).

The performance of each system is evaluated using efficiencies based on the first two laws of thermodynamics. We could establish the efficiencies for the three principal bodies of the line of production: The energy and exergy efficiencies of the boiler, matter and boiling tank are found to be (86%, 25,63%, 32,05%) and (34%, 13,42%, 19, 53%), respectively.

It has been found that the combustion chamber is the major contributor for exergy destruction followed by heat exchanger of a boiler system. The optimization of the two tanks of matter and boiling is difficult, because the energy consumptions are irreversible, the use of these last in the process of cooking of the matter or wort. On the other hand, several measurements of economy must be applied to reduce the losses of energy in the boiler such as: the heat recovery from flue gas for heating air combustion or heating process water using heat exchangers, the re-use of the condensed hot water for the supply of the boiler or cleaning of the materials.

Key words: Energy, Exergy, Degradation.

Introduction générale

La consommation d'énergie élevée dans le secteur agroalimentaire augmente les coûts de production dans ce secteur.

L'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que les économies d'énergie sont la préoccupation majeure dans la plupart des pays développés du monde entier.

La chaîne de production d'une boisson à base de malt d'orge dans l'entreprise de transformation alimentaire est choisie pour l'étude et l'analyse thermodynamiques des dégradations d'énergie, sur la base de la première et la deuxième loi de la thermodynamique.

L'efficacité énergétique évoquée ne tient pas compte de la dégradation de l'énergie qu'introduit systématiquement toute transformation, du fait de son irréversibilité, conformément au deuxième principe de la thermodynamique. L'analyse thermodynamique des procédés, par l'approche exergetique, est une démarche qui se généralise actuellement. Elle est essentielle en vue de l'optimisation énergétique des procédés. Elle se définit comme étant l'utilisation rationnelle et judicieuse des réserves énergétiques, dans une perspective de développement durable qui répondent aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures.

Notre travail consiste à l'application de l'analyse énergétique et exergetique sur les trois parties de la chaîne de production de cette boisson: la chaudière, la cuve de matière et la cuve d'ébullition, pour localiser les dégradations les plus importantes.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre la présentation de l'entreprise de boissons de REGHAIA, ainsi que le fonctionnement de la chaîne de production.

Le deuxième chapitre consiste en une analyse bibliographique de l'approche exergetique de l'analyse thermodynamique des procédés.

Le troisième et le quatrième chapitre sont consacrés aux études de chacune des parties: la chaudière, la cuve de matière et la cuve d'ébullition, afin de faire la comptabilité des grandeurs thermodynamiques des différents produits et des énergies mises en jeu.

Enfin, à partir des résultats obtenus et de leur interprétation nous proposons des recommandations et des orientations à l'intention des services techniques de production de l'entreprise, sous forme d'une conclusion générale.

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA CHAÎNE DE PRODUCTION

D'UNE BOISSON

INTRODUCTION

L'unité EPBR Reghaia est implantée sur un terrain de 8 hectares faisant partie de la zone industrielle de Reghaia à 30 Km à l'est d'Alger sur la route nationale N° :5. Elle fut construite en 1959 et mise en production en 1960. D'abord sous tutelle de l'administration coloniale, Il fallait attendre le 7 décembre 1974, pour que l'état Algérien s'associe au partenaire étranger en achetant le 75% des parts. L'unité devient ainsi mixte avec la société nationale des eaux minérales E.N.E.M.A ; deux ans après en février 1976, l'Algérie achète le complément de l'unité (25%) qui sera directement rattaché à l'E.N.E.M.A.

L'unité ne produisait que la bière et cela jusqu'en 1983 avant de commencer la fabrication des boissons gazeuses sous tutelle du ministère des industries légères.

Actuellement, la gamme de produit proposée par l'entreprise recouvre les catégories suivantes :

- ✓ Boissons sans alcool : la gold
- ✓ Boissons gazeuses: martinazzi et bitter
- ✓ Boissons alcoolisées: bière.

avec une capacité de production par catégorie:

- la gold: 29 024 l/j
- limonade: 124 800 l/j
- la bière: 195 600 l/j

1.1. MALTAGE

L'orge est la céréale indispensable à la fabrication de notre boisson, pour être utilisée en brasserie, elle doit subir un traitement: "***Le maltage***".

Les grains d'orge sont d'abord maltés, c'est-à-dire mis à germer. Le maltage consiste à favoriser par la trempée et la germination, le développement des enzymes et la transformation de l'amidon en maltose puis celle du maltose en glucose. L'activité enzymatique est ensuite stoppée par séchage (touraillage) pour donner le malt, produit de bonne conservation devenu inerte.

La figure suivante présente les étapes de fabrication de malt.

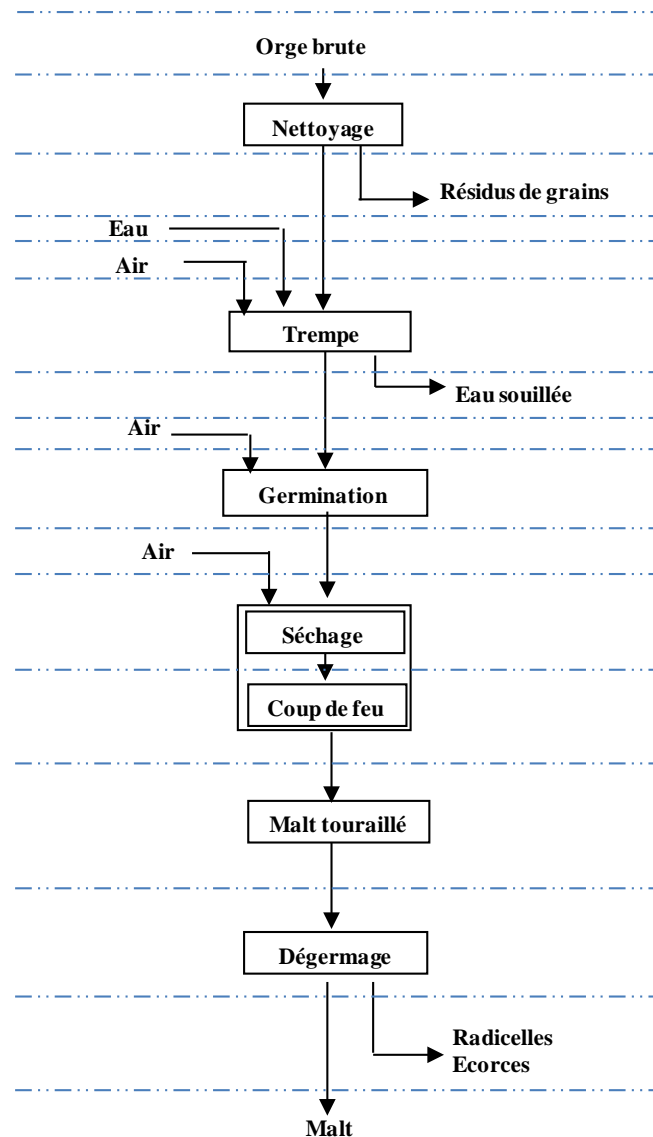


Figure I.1: Etapes de fabrication de malt [11].

I.2. TECHNOLOGIE DE FABRICATION

Le processus de fabrication d'une boisson de malt a été divisé en plusieurs opérations élémentaires qui ont été regroupées dans quatre groupes principaux qui s'effectuent dans la salle de stockage, la salle de brassage, la salle de filtration et enfin la salle d'emballage.

Les étapes de fabrication d'une boisson de malt sont schématisées sur la figure I.2, les processus de fabrication dans les ateliers de broyage et brassage sont présentés dans la figure I.3 à la page suivante.

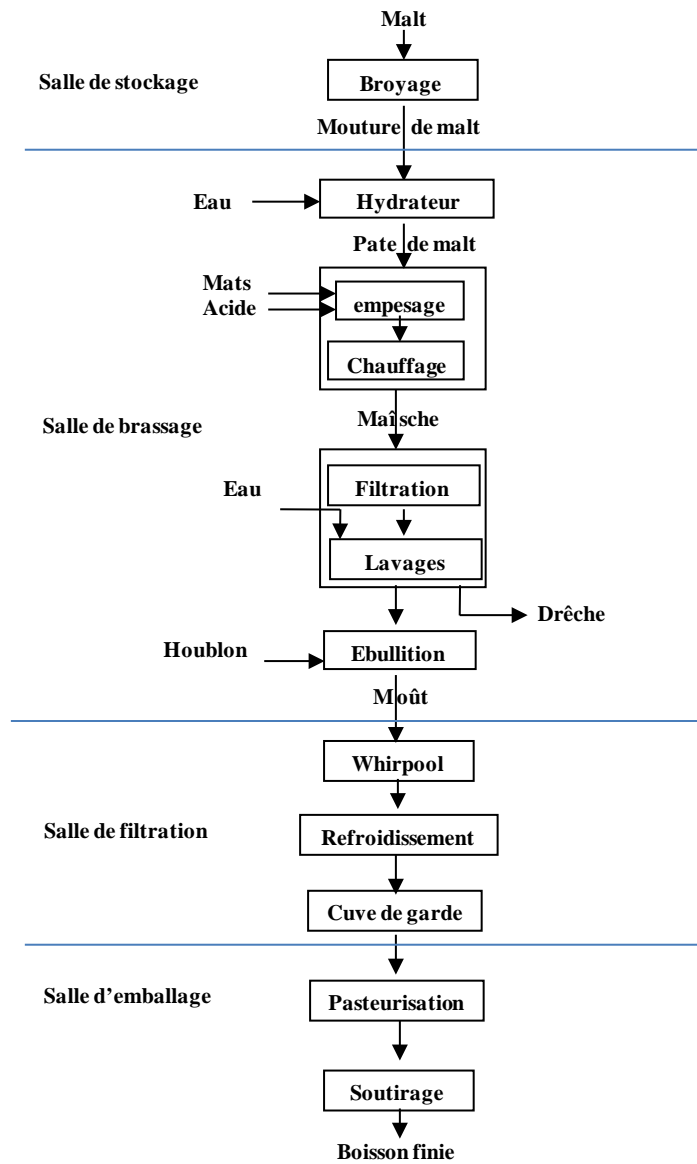


Figure I.2: Etape de fabrication d'une boisson de malt.

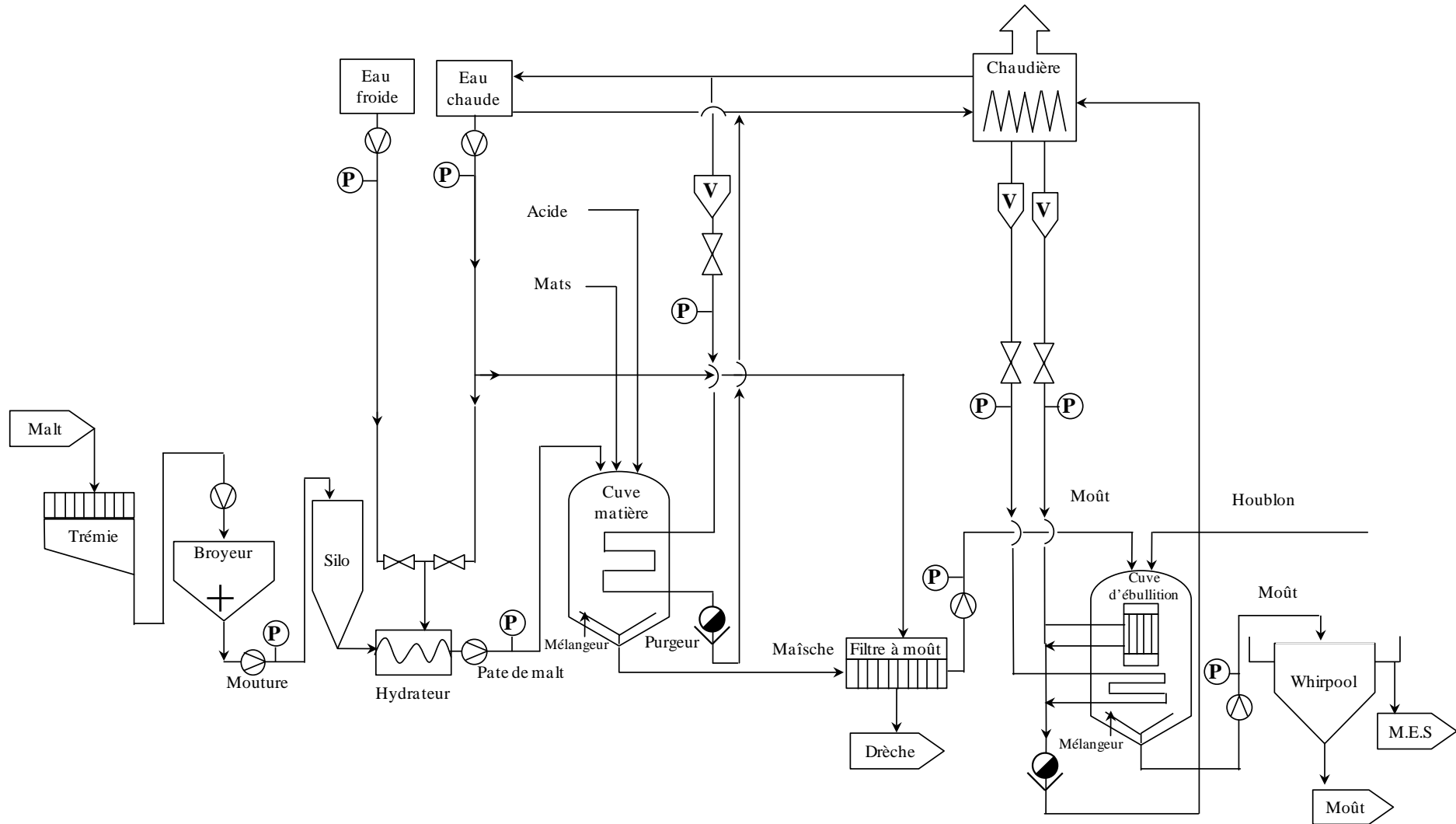


Figure I.3: Procédé de fabrication de boisson à base de malt d'orge des ateliers de broyage et de brassage

I.3. BROYAGE

Pour récupérer le maximum d'extrait, le malt doit être réduit en particules de petite taille, à l'aide d'un broyeur à 5 cylindres (à 3 passages), pour permettre les réactions enzymatiques pendant le processus de brassage ; puis la mouture est mise en silo de stockage.

L'objectif du broyage du malt est d'obtenir une mouture de différents agglomérats :

- ✓ des écorces entières et séparées de l'amande (grain d'amidon) ;
- ✓ des gros gruaux en faible quantité (ils sont longs à saccharifier) ;
- ✓ des gruaux fins en grande quantité ;
- ✓ de la farine fine en très faible quantité [10].

Il est indispensable de broyer le malt de façon à maintenir les écorces entières, qui serviront par la suite de support de filtration et d'éviter une mouture avec une proportion trop importante de fine farine de particules inférieures à 120 Pm, qui formerait alors une couche imperméable lors de cette filtration [8].

La nature et la finesse de la mouture dépendent de l'appareil de filtration mais aussi du type de grains crus.

Il y a deux types de mouture:

- sèche, qui est destinée au filtre presse et la cuve filtre en couche mince ;
- humide, qui est adaptée à la cuve filtre en couche épaisse.

- **Mouture sèche**

L'opération s'effectue dans des broyeurs à cylindres. Pour un bon concassage plusieurs conditions doivent être respectées :

- a) Le malt doit être débarrassé de la poussière, des particules dures, (cailloux) métalliques et grossières. Cette opération est réalisée dans un épierreur et un séparateur magnétique qui limitent également les risques d'explosions de poussières.
- b) Le malt doit être sec (au moins les parties internes), de façon à ne pas coller sur les cylindres et les tamis ; toutefois, si on humidifie légèrement le malt à l'entrée du concasseur, cela revient simplement à ramollir les enveloppes qui sont ainsi plus élastiques et se déchirent moins, ce qui facilite la filtration.
- c) Il est important que tous les grains aient la même dimension, pour éviter que les petits grains ne soient pas atteints par les cylindres et les gros soient réduits en farine fine.

1.3.1. Contrôle de la mouture

La finesse de la mouture se contrôle par triage des diverses parties du malt égrugé à l'aide d'un plansichter de laboratoire. La plupart des plansichters sont équipés de six tamis superposés mais en fait, pour le contrôle de la mouture, on ne se sert que de trois rapports qui sont: enveloppes- gruaux- farine.

Avec les deux dispositifs à prélever les échantillons, placés sous le 3^{ème} passage, on prélève un échantillon d'environ 150 à 200 g. Après pesage précis de cet échantillon et des parties du malt égrugé obtenues après le tamisage, ces parties sont converties en pourcents.

Les valeurs suivantes (% poids) sont généralement recommandées pour le filtre presse:

Enveloppes12 à 15 %

Gruaux.....40 à 45 %

Farine.....40 à 45 %

1.3.2. Différents types de broyeurs

Selon le nombre de passages on distingue trois types:

✓ Broyeur à un seul passage

C'est le système le plus simple qui existe dans certaines petites brasseries, où le rendement et la cadence de brassage n'ont pas beaucoup d'importance.

Ce type d'appareil produit une mouture grossière avec beaucoup d'écorces et de gros gruaux et peu de farine fine.

✓ Broyeur à 2 passages

Ces concasseurs ont deux paires de cylindres. Entre ces deux paires est installé un tamis qui sépare la farine et dirige les gruaux et les enveloppes sur la deuxième paire de cylindres.

✓ Broyeur à 3 passages (à 5 cylindres)

Ce sont les appareils les plus répandus, ils fonctionnent selon le principe :

Moudre-Tamiser-Moudre-Tamiser- Moudre-Tamiser ; et les cylindres ont pour fonctions respectivement:

-1^{ère} paire : écrasement des grains de malt ;

-2^{ème} paire : traitement des écorces ;

-3^{ème} paire : traitement des gruaux.

Ces appareils permettent d'obtenir une mouture de bonne qualité, avec un débit d'environ 800 Kg /h.

Le broyeur est équipé d'un système de pesage, d'un épierreur et d'un séparateur magnétique.

I.3.3. Fonctionnement du broyeur à 3 passages (à 5 cylindres)

La figure (I.4) montre le fonctionnement du broyeur à trois passages, dont on donne l'explication ci-après.

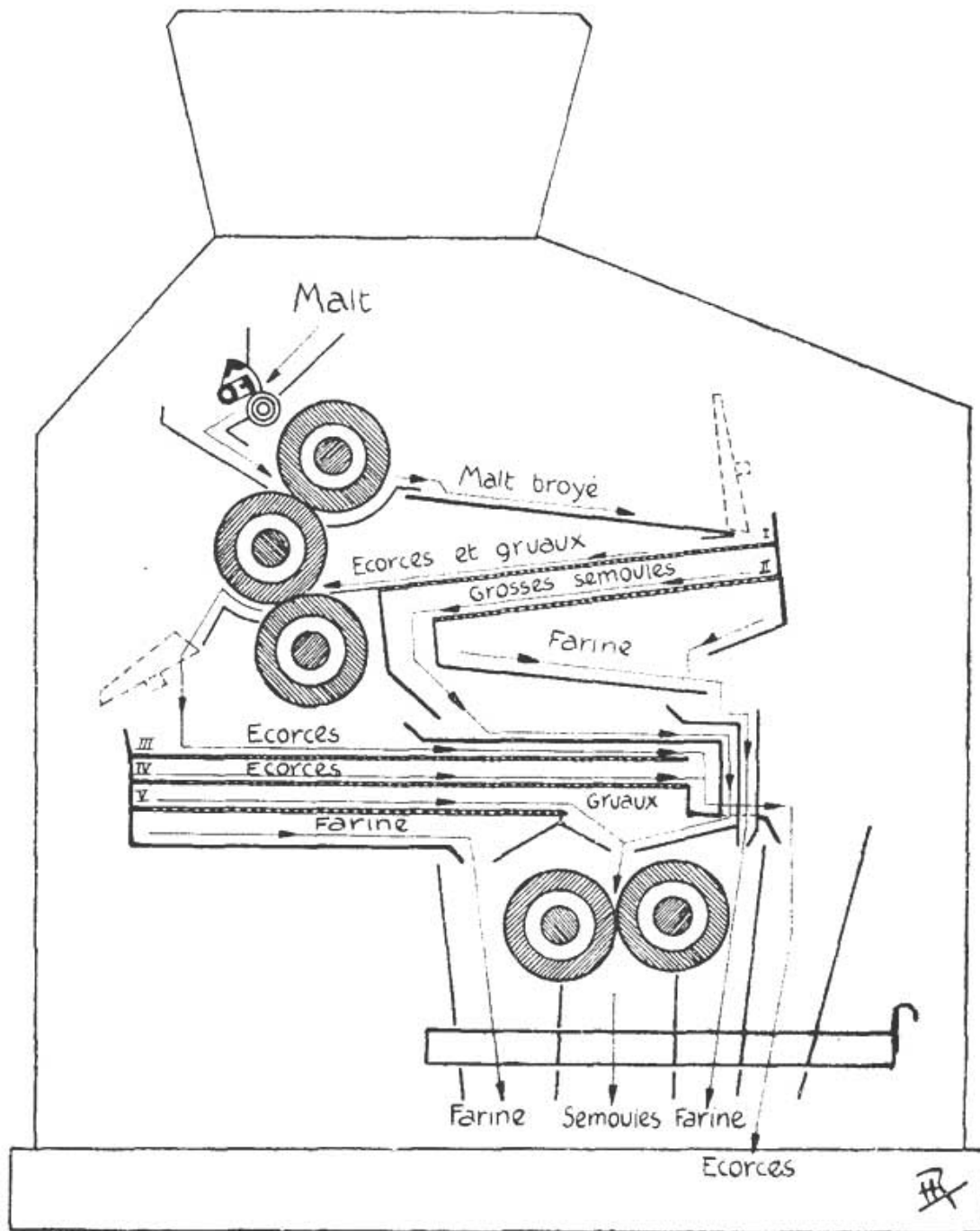


Figure I.4: Schéma simplifié d'un broyeur à 5 cylindres

Le produit à broyer passe devant un aimant tournant permanent, pour arriver dans la chambre d'alimentation où, il est jeté dans le premier passage à l'aide du cylindre d'alimentation. Le clapet d'alimentation est réglé sur le rendement désiré. Le tiroir de dosage dans la pièce intermédiaire doit être réglé sur un rendement supérieur. L'écartement des cylindres dépend de la grosseur des grains et de la qualité de malt: le grain doit être bien ouvert et les enveloppes doivent rester entières, il ne doit pas non plus se produire un grand pourcentage farineux.

Le malt ainsi égrugé arrive, via la tôle d'explosion, sur l'émetteur supérieur et est dirigé sur le tamis I via la tôle de guidage. L'extraction, semoule grosse et parties plus fines suivant le numéro de tamis, respectivement malt égrugé de cuve-filtre ou malt égrugé de filtre à moût, tombe sur le tamis II. L'extraction du tamis II, semoule fine et farine, arrive à la sortie en passant par des tôles de guidage. Les parties grossières du refus du tamis II, semoule grosse, parviennent, via la tôle de guidage, par le passage en croix, dans le 3^{ème} passage des cylindres 4 et 5. Le refus du tamis I parvient au 2^{ème} passage des cylindres 2 et 3, via la tôle d'explosion vers le tamis III.

L'écartement entre les cylindres doit être ajusté de telle sorte que les gruaux accrochés aux enveloppes soient enlevés et contiennent un minimum de partie farineuse et de petites enveloppes. L'extraction du tamis III tombe sur le tamis IV. Les refus de ces deux tamis, enveloppes grossières et fines, parviennent ensemble par le passage en croix, à la sortie. L'extraction du tamis IV tombe sur le tamis V, dont l'extraction, semoule fine et farine, est dirigée à son tour vers la sortie.

Le refus du tamis V, composé de semoule grosse, parvient directement dans le 3^{ème} passage où le tiroir d'alimentation doit être ajusté de telle sorte qu'il y ait toujours un petit reste. Dans le 3^{ème} passage, nommé aussi passage de la semoule, la semoule grosse est broyée à la finesse voulue. L'écartement entre les cylindres dépend généralement de la grosseur de la semoule, qui parvient à la sortie via la tôle d'explosion.

La farine est stockée sous le concasseur, dans une trémie à farine en tôle, munie d'une porte et d'un évent équipé d'un filtre à poussière (anti-explosion). La contenance doit être au moins de 300 litres pour 100 kg de malt (100 kg de malt en farine occupent de 220 à 300 l). Cette trémie est parfois posée sur des pesons ; sinon le système de pesage situé sur l'arrivée du malt au moulin suffit à fixer le versement.

La figure I.5 représente le broyeur à 5cylindres réel installé au niveau d'E.P.B.R.



Figure I.5: Broyeur à 5 cylindres

I.4. BRASSAGE

L'objectif du brassage est d'obtenir la meilleure extraction solide/ liquide ou de solubiliser la plus grande quantité de matières hydrosolubles du malt appelé "*extrait*". Plusieurs facteurs influencent la qualité et le rendement de brassage: la qualité du malt, la composition de l'eau de brassage, le rapport eau/ versement, le pH de la maïsche, le diagramme de température de la cuve matière, la conformation des vaisseaux et l'efficacité de l'agitation (effet de cisaillement) etc. [8]

L'extraction se fait par l'eau, à des températures appropriées.

I.4.1. Technologie du brassage

Il y a un grand nombre de méthodes de brassage que nous regrouperons en trois catégories :

- ✓ Les méthodes par infusion, qui consistent à réaliser l'empâtage à une température déterminée d'environ 65°C. Celle-ci est ensuite diminuée ou augmentée par des ajouts d'eau ;
- ✓ Les méthodes par décoction, caractérisées par des chauffages successifs à des températures variant de 42 à 78°C, en évitant de stationner aux températures intermédiaires.
- ✓ Les méthodes mixtes, qui opèrent par combinaison [10].

I.4.2. Méthodes par décoction

Elle implique la montée en température de la maïsche et le stationnement aux températures optimales correspondant aux enzymes que l'on veut faire agir comme suit :

- 42 à 60 °C : protéolyse et dégradation des béta-glucanes;
- 62 à 67 °C : production de maltose;
- 70 à 75 °C : saccharification;
- 78°C : filtration de la maïsche [10].

Utilisant les enzymes produites ou activées pendant le maltage, l'opération de brassage va mettre en œuvre les transformations biochimiques qui amèneront le moût à contenir les éléments nécessaires (sucres). Chaque enzyme possède des conditions optimales et létales d'action (température, pH); la connaissance de ces caractéristiques est indispensable pour réaliser un brassage optimum.

I.4.3. Transformations biochimiques

Les principales transformations ont lieu au niveau des composés glucidiques puisqu'ils représentent environ 90 % des solides du moût [8].

I.4.3.1. Matières glucidiques

A. Amidon

L'amidon de l'orge est constitué de gros grains de forme ovale (20 – 40µm) et de petits granules (1 – 6µm) qui représentent 90% du nombre mais seulement 10% de la masse; leur température d'empesage est un peu supérieure (60-65°C) à celle des gros grains (58-62°C).

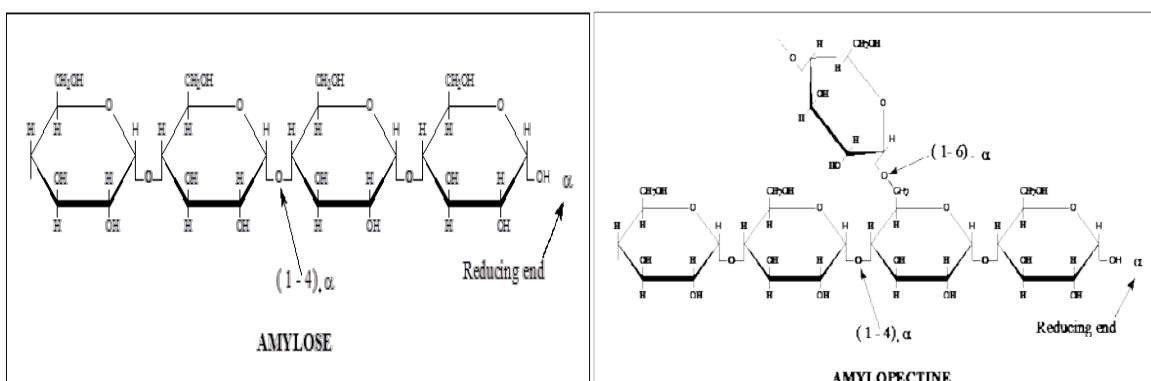
La transformation de l'amidon est influencée par:

- la température de la maïsche et la durée de stationnement entre 62 °C et 67 °C
- le pH de la maïsche
- la concentration de la maïsche.

L'amidon est difficilement attaquant par les enzymes, il doit être au préalable transformé en empois (solution visqueuse) par gonflement et éclatement des granules dans l'eau chaude. Il est formé de 2 types de chaînes de molécules de glucose ($C_6H_{12}O_6$), l'amylose et l'amylopectine, dont les spécifications sont résumées dans le tableau et la figure ci-dessous:

Tableau I.1: La composition chimique de l'amidon [10].

	Amylose (20-25 %)	Amylopectine (75-80 %)
Structure	Non ramifiée/hélice	Ramifiée /hélice
Longueur des chaînes	1000 glucose	20-25 glucose
Degré de polymérisation	1000	104-105
Liaisons	α (1-4)	α (1-4) et α (1-6)
Solubilité dans l'eau	Soluble	insoluble



Les enzymes agissant sur les chaînes d'amidon sont en nombre de quatre:

➤ **L'amylase α**

Température optimum 70 à 75 °C, température létale 80 °C et pH optimum 5,6 à 5,8. C'est un endo enzyme qui coupe les liaisons α -1-4 à l'intérieur des chaînes, sauf aux ramifications, pour produire des chaînes plus courtes.

➤ **L'amylase β**

Température optimum 62 à 65 °C, température létale 70 °C et pH optimum 5,4 à 5,6. C'est un exo enzyme qui coupe la deuxième liaison α -1-4 à partir d'une extrémité réductrice pour produire du maltose.

En fait les deux enzymes coupent les liaisons α -1-4 et n'attaquent pas les liaisons β -1-6.

➤ **La dextrinase limite**

Elle attaque uniquement les liaisons α -1-6 des chaînes ramifiées. La dextrinase limite augmente la quantité de sucres fermentescibles produite dans un moût : sa température optimale est de 55 à 60 °C et sa température létale de 65 °C. Cette enzyme agit peu en brasserie pour deux raisons:

- à 55 °C, l'amidon du malt est à peine empesé
- La dextrinase limite et l' α -amylase agissent en synergie et l' α -amylase est peu active à 55°C.

Lorsque les conditions sont réunies pour que la dextrinase limite opère, elle a été inactivée par la température.

➤ **La maltase**

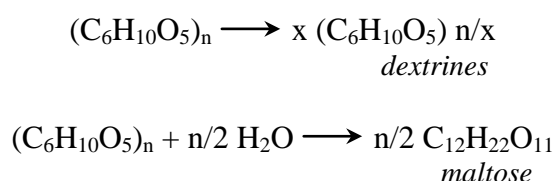
Elle transforme le maltose en glucose ; inactivée au-dessus de 40 °C, elle a peu d'influence dans les conditions habituelles de brassage [10].

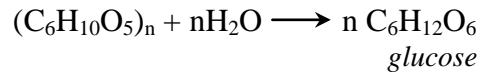
B. Dégradation de l'amidon

Quantitativement, la dégradation de l'amidon en dextrines et sucres est le plus important.

La formule brute de l'amidon est: $(C_6H_{10}O_5)_n$

Il se transforme en maltose surtout et en dextrines par l'amylase et en glucose par les acides, selon les réactions :





Au brassage, ce sont surtout les deux premières réactions qui se produisent, par l'action des amylases. La figure I.6 montre les voies d'hydrolyse des grains d'amidon :

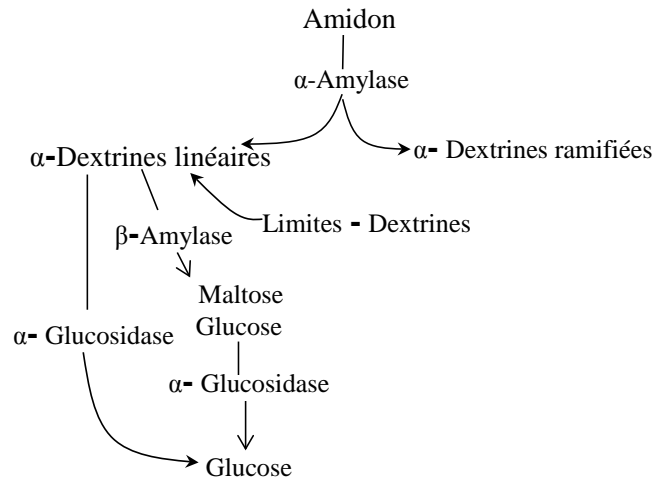


Figure I.6: Voies d'hydrolyse des grains d'amidon [10].

I.4.3.2. Matières azotées

Les matières azotées sont essentiellement transformées au maltage tel que:

- ✓ 70% des matières azotées du moût sont dédoublées pendant le maltage et 30% seulement sont solubilisées au brassage.
- ✓ 75% de l'azote aminé libre préexiste avant le brassage.

L'indice Kolbach, qui mesure le pourcentage de protéines solubles par rapport aux protéines totales, est un bon indicateur de la solubilisation des protéines.

Les matières azotées obtenues au brassage sont d'une nature différente de celles issues du maltage. En effet, les exopeptidases, peptidases, carboxy-peptidases, etc. sont soit fortement affaiblies pendant le touraillage, soit agissent à des pH plus faibles que celui du moût. Certaines peptidases, qui donnent les matières azotées les plus simples, ont été inactivées au touraillage.

Les protéinases ont une température optimale de 45-50°C, une température létale de 70°C et un pH optimum de 4,5-5,0.

Les carboxy-peptidases ont une température optimale de 50-60°C, et une température létale de 70°C. Cet enzyme est responsable de 75% des acides aminés produits au brassage.

Ce sont donc essentiellement les protéinases qui agissent pendant le brassage, donnant des chaînes relativement longues de polypeptides.

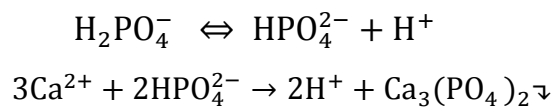
1.4.3.3. Hemicelluloses et β -glucanes

Les hemicelluloses sont les principaux constituants des parois cellulaires de l'endosperme ; elles sont formées de bêta-glucanes (80%) et de pentosanes (20%) dont la structure et les propriétés sont très différentes.

1.4.3.4. Phosphates organiques

Les phosphates sont les plus importants des composés minéraux issus de l'orge et ils interviennent dans de nombreux processus biochimiques.

La phosphatase (ou phytase) libère vers 50-53°C d'acide phosphorique de la phytine. Cet acide va se transformer en phosphates primaire et secondaire par réaction avec les sels de l'eau et de la maische (Ca, Mg) et contribuer au pouvoir tampon du moût, suivant les réactions:



La précipitation du phosphate tricalcique déplace l'équilibre vers la droite, libérant ainsi des ions H^+ .

1.4.3.5. Acidification au brassage

Le pH joue un rôle important au brassage car il va influencer largement l'action des enzymes, le rendement de brassage et de houblonnage, la couleur et la précipitation des matières protéiques.

Ainsi en cuve d'ébullition, il doit être voisin de 5,6 et celui en fin d'ébullition de 5,3, mais en pratique, on arrive rarement à ces pH sans correction de l'eau. Donc, même lorsque l'on a une eau très pure, il convient de la corriger pour ajuster son pH à un optimum. L'addition d'acide se fera un peu avant la fin d'ébullition afin de ne pas nuire au rendement de l'isomérisation.

En cuve matière, on acidifie de façon à obtenir un pH voisin du pH optimum des α et β amylases (5,6); il est bon de corriger également les eaux pour le lavage du drèche.

Les acides ajoutés sont : sulfurique, chlorhydrique, lactique, phosphorique ; le choix est effectué selon le rééquilibrage que l'on veut apporter par rapport à la composition de l'eau et au type de boisson [10] .

1.5. TECHNIQUE DE BRASSAGE

✓ Empâtage

L'empâtage consiste à hydrater la mouture de malt, il s'effectue dans un hydrateur qui met en contact eau chaude et mouture.

✓ Empesage

L'empesage est l'étape du brassage au cours de laquelle on fait éclater les granules d'amidon, par chauffage en solution aqueuse. Il s'effectue sous agitation dans des cuves matières.

✓ Liquéfaction

La liquéfaction, correspond à la diminution de la viscosité, elle se fait sous l'action de l' α amylase. Cette action est très rapide, puisqu'il suffit que 0,5% des branches d'amylopectine soient brisées pour que l'amidon puisse déjà être considéré comme liquéfié. La viscosité a presque entièrement disparu lorsque 10% des branches d'amylopectine sont brisées.

✓ Saccharification

Lorsque tout l'amidon a été empesé puis liquéfié, les amylases α et β agissent sur ces chaînes en formant des sucres fermentescibles à hauteur 80 % et des sucres non fermentescibles pour 20 % [13].

✓ Contrôle de saccharification

Le contrôle s'effectue à l'aide du test à l'iode, qui permet de vérifier que la transformation de l'amidon en sucres et dextrans de petite taille (< 9 glucose) est terminée. L'iode donne avec l'amidon et les dextrans à longue chaîne une couleur bleue et avec les dextrans limites une couleur rouge.

La saccharification est normale lorsque l'ajout de quelques gouttes d'une solution d'iode 0,02N de couleur jaune, à un échantillon de maïsche à température ambiante, ne donne aucune couleur.

1.5.1. Description du brassage

Après mouture du malt, on procède à son empâtage à une température de 42 °C et dure environ 30 mn; il est suivi de l'ajout de l'enzyme puis de la fermeture de la vanne vapeur. Cette pâte est mise au stationnement pendant 30 mn.

Après, on procède à l'ouverture de la vanne à vapeur afin de porter la température du mélange à 50 °C, on ferme à nouveau la vanne à vapeur et on laisse la pâte au repos pendant 45mn. Cette étape est suivie de deux augmentations de la température, selon un intervalle régulier de 10 mn. Pendant les premières dix minutes, on porte la température à 65°C et au cours des 10 mn suivantes, la température est portée à 75°C et maintenue pendant 10 mn.

Cette opération est suivie d'une cuisson pendant 20 mn à la même température et on laisse stationner pendant 5mn. La filtration de la drêche qui a lieu après les 5 mn de stationnement est précédée du contrôle de saccharification.

Une fois la saccharification est complète, on procède alors à la filtration pendant 10mn, puis le rinçage des drêches par de l'eau chaude.

Le moût recueilli est ensuite porté à ébullition à 100 °C, pendant une heure ensuite on procède à l'ajout du houblon amer puis le houblon aromatique 15mn avant la fin d'ébullition. On procède alors au refroidissement du moût, qui se fait en deux étapes :

- ✓ la première consiste à éliminer le trouble et les impuretés se trouvant dans le moût;
- ✓ La deuxième consiste à refroidir le moût entre 10 et 11°C.

La figure I.7 montre le brassage par décoction.

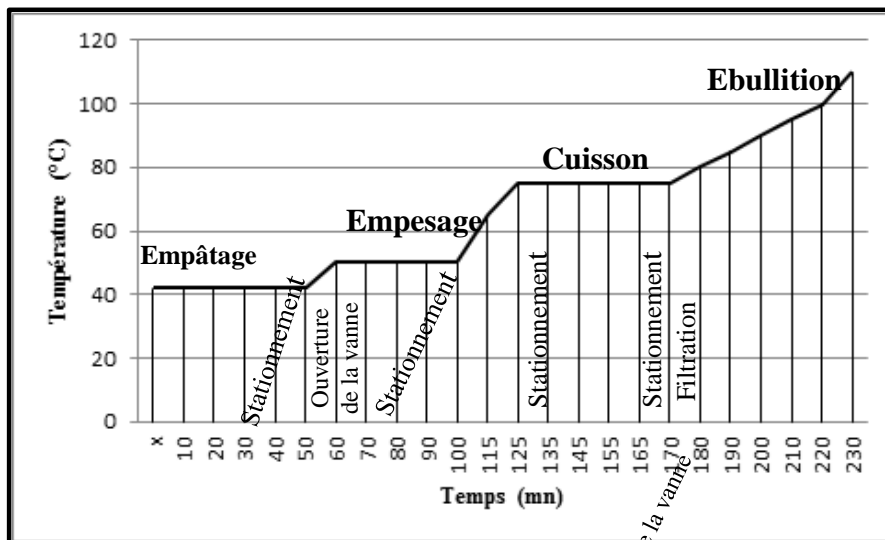


Figure I.7: Courbe de brassage par décoction

I.6. FILTRATION DE LA MAISCHE

La maïsche est envoyée au filtre presse dès que la saccharification est atteinte. Le but de la filtration est de séparer le moût (extrait aqueux soluble), des écorces et des parties d'amande non solubilisées (les drèches) en extrayant le maximum de matières dissoutes. C'est à ce niveau que les enveloppes préservées lors du concassage constituent le gâteau de filtration. Cette opération comporte deux étapes:

- ✓ La filtration proprement dite où l'on sépare le premier bouillon (où premier moût) des drèches;
- ✓ Les lavages qui permettent de récupérer les matières dissoutes, en particulier des sucres qui restent dans les drèches. Ils s'effectuent avec de l'eau chaude à environ 80 °C (Jeantet et al ,2007 ; Fillaudeau et Blanpain-Avet, 1999).

Le nombre de lavages dépend de la concentration du premier moût et de celle à atteindre en cuve d'ébullition.

La viscosité du moût augmente avec sa concentration et diminue avec l'augmentation de la température, il n'est pas souhaitable de dépasser 78°C pour les lavages car l'amidon extrait à plus haute température ne pourrait être saccharifié par l' α - amylase qui se détruit à 80°C. Il y a donc un compromis à trouver entre le temps de filtration, le rendement de brassage, la durée d'ébullition et le coût énergétique.

Par ailleurs, la concentration en sucres (densité) des derniers lavages est un paramètre important sur le plan économique et qualitatif. Leur réutilisation pour l'empâtage ou les lavages des brassins suivants est à considérer non seulement sous l'aspect économique, mais aussi sous l'aspect qualitatif.

La filtration peut se faire dans: la cuve filtre, ou, de façon plus courante, dans le filtre presse, qu'on décrit succinctement.

➤ ***Filtre presse***

Le filtre presse a été inventé par " Meura ", il utilise le principe de la filtration sur couche mince sous pression. Il a été introduit en brasserie au début du 20^{ème} siècle et n'avait rencontré qu'un succès modéré. D'importants perfectionnements apparus vers 1990 l'ont rendu attractif à nouveau.

Il est constitué d'un ensemble de cadres métalliques creux et de plateaux, supportés par deux longerons et maintenus serrés entre une tête fixe et une tête mobile, sur lesquels sont

disposées des toiles filtrantes en polypropylène. L'ensemble est serré par un vérin hydraulique, de façon à assurer l'étanchéité pendant les séquences de filtration. L'entrée de la maîsche et la sortie de moût se font par le bas, réduisant ainsi les risques d'oxydation. Le brassin ou la maîsche saccharifiée est pompé par le canal supérieur, et se répartit dans les cadres creux: la drèche est retenue par les toiles et reste dans ces cadres, tandis que le moût passe à travers la toile et rejoint le plateau adjacent d'où il est évacué vers l'extérieur par un robinet ou un collecteur.

Après pompage complet de la maîsche et écoulement du premier bouillon, il convient de laver les drèches. De l'eau chaude 80°C est admise dans un plateau sur deux, elle traverse les toiles puis les drèches du cadre creux et est évacuée dans le plateau adjacent par un expulseur utilisant l'air comprimé. Les toiles sont décolmatées tous les 30 à 50 brassins par immersion dans une solution caustique chaude (5% et 75 °C) puis rinçage sous haute pression. Les drèches sont récupérées pour être utilisées dans des composés ou bien vendues telles quelles, dans le but d'alimenter le bétail.

1.7. CUISSON (traitement du moût)

Pendant la cuisson le moût filtré est porté à ébullition dans la chaudière à houblonner où, comme l'indique son nom, est ajouté le houblon. Cette opération qui dure 90 minutes à pH 5,2 (pH du moût), a quatre objectifs (Jeantet et al ,2007 ; Vermeylen, 1973) :

- ✓ Stériliser, stabiliser le moût en détruisant les enzymes et coaguler les matières azotées;
- ✓ Développer la couleur et la flaveur du moût en éliminant les mauvaises odeurs soufrées;
- ✓ Isomériser les α -humulones du houblon en isohumulone pour révéler leur amertume;
- ✓ Concentrer le moût : la cuisson entraîne une concentration par évaporation, qui permet d'amener le moût à la densité désirée.

Par ailleurs, l'ébullition du moût amène une stabilisation de trois sortes:

a) Biologique

Le moût arrivant à la chaudière d'ébullition peut contenir des bactéries résistantes à la chaleur, une ébullition simple (à pH de 5,2) suffit à stériliser le moût. Les propriétés bactériostatiques du houblon contribuent à protéger ensuite le moût.

b) Biochimique

Tous les enzymes sont détruits, en particulier l' α -amylase, qui est le principal enzyme à avoir survécu aux températures de filtration. L' α -amylase bactérienne ajoutée parfois pour traiter les grains crus est active jusque 100 °C.

Cette destruction des enzymes permet d'éviter, au cours du traitement, une modification de la composition en sucres du moût, qui serait gênante et pourrait créer des problèmes de stabilité biologique.

Il est toutefois prudent de ne pas chauffer au-dessus de 80 °C avant la fin des lavages, les traces d'amidon libéré pendant les lavages peuvent ainsi être encore saccharifiés par l' α -amylase.

a) Colloïdale

En vue d'améliorer la stabilité colloïdale, on doit éliminer par coagulation et précipitation les matières azotées et les associations protéines tannins. Un simple chauffage du moût ne suffit pas. La coagulation est influencée par d'autres facteurs notamment :

✓ La température

Elle accélère toutes les réactions; l'ébullition sous pression permet d'obtenir la coagulation en très peu temps.

✓ La durée de l'ébullition

L'ébullition dure normalement de 1 h à 1 h 30 ; car il y a cassure au-delà de 2 heures cela n'améliore pas la précipitation des protéines.

✓ La vigueur physique de l'ébullition

Les bulles de vapeur qui apparaissent dans une ébullition intense aident à la formation d'une bonne coagulation.

✓ Facteurs chimiques

Les facteurs chimiques qui influencent la stabilité colloïdale sont complexes. La présence d'oxygène dans le moût inhiberait la coagulation de protéines : l'addition d'agents réducteurs, tels que les sulfates, améliorent cette coagulation. La réaction qui se produit entre le calcium de l'eau et les phosphates diminue le pH, Cette diminution facilite la précipitation des protéines. Un pH de 5,2 est considéré comme optimum.

Lorsque le pH ne diminue pas suffisamment, on ajoute directement de l'acide au commencement de l'ébullition.

A pH bas les éléments de la cassure forment des agrégats beaucoup plus importants qui sédimentent plus facilement et donnent un moût plus clair.

1.7.1. Aspect chimique du houblon

Le houblon contient différentes substances qui jouent un rôle dans la qualité de la boisson :

1. Résines amères

Le houblon contient des acides α et β peu amers et peu solubles. Par chauffage, les acides α vont se dissoudre, se transformer en leurs isomères nettement plus amères et plus solubles.

2. Huiles essentielles

Les huiles essentielles du houblon sont responsables de l'arôme caractéristique du houblon frais qui a une grande importance au point de vue de l'appréciation gustative.

Lors de l'ébullition du moût en chaudière, ces huiles sont entraînées par la vapeur d'eau et disparaissent à raison de 50 à 80% en 30 mn.

C'est pour cette raison que l'on utilise en chaudière le houblon le plus fin pour l'addition la plus tardive afin d'éviter l'élimination totale des huiles essentielles.

Toutefois, la dernière addition de houblon doit être faite au moins 15 mn avant la fin de la cuisson pour permettre la transformation nécessaire des résines tout en limitant l'entraînement des huiles par la vapeur d'eau.

3. Tannins

Les tannins sont solubles dans l'eau tiède, Par chauffage de leur solution aqueuse, Par traitement à chaud en milieu acide, les tannins se condensent en phlobaphènes à la suite de la réunion de deux molécules et élimination d'eau.

Les phlobaphènes sont des sols amorphes de couleur brun rouge, moins solubles dans l'eau que les tannins. Leurs sols aqueux contiennent des micelles négatives, ils précipitent également les protéines.

Le tannin du houblon donne avec les protéines non assimilables du moût, surtout avec la fraction globuline, des complexes solubles à chaud, beaucoup moins solubles à froid et qui participent pour une faible part à la cassure en chaudière et pour une part beaucoup plus

importante, au trouble à froid lors du refroidissement du moût. Le pH optimum de floculation est voisin de 5,2.

1.7.2. Houblonnage

La tendance actuelle est de répartir le versement du houblon en deux charges pour améliorer le rendement d'isomérisation :

La première qui présente $\frac{1}{4}$ du totale, est ajoutée 15 min après le début de l'ébullition, c'est-à-dire quand la coagulation commence à apparaître. Le houblon le plus amer, le moins fin et le plus riche en tannin est ajouté en premier.

La seconde est la principale charge, est ajoutée 15 mn avant la fin de la cuisson c'est elle qui donnera la principale amertume du houblon, ce sont des houblons aromatiques les plus fins qui pourront laisser une fine odeur de houblon. On ajoute le houblon sous forme des pellets.

La figure ci-après montre la forme du houblon.



Figure I.8: Houblon sous forme des pellets.

1.7.3. Composition du moût

La composition du moût conditionne les propriétés de la boisson finie. Le moût doit contenir les quantités voulues de sucres fermentescibles de substances nutritives, ainsi que les composés responsables de la flaveur.

Au cours du brassage, il y a de fortes précipitations qui éliminent des quantités variables de ces constituants. Des composés comme les lipides, les substances amères, les protéines, s'éliminent préférentiellement dans les précipités. Il peut disparaître sous cette forme plus de la moitié des lipides.

1.7.3.1. Hydrate de carbone

La composition en sucre du moût peut varier dans les limites assez larges

- Fructose : 1,2 – 3,3%
- Glucose : 9,3 – 10%
- Saccharose : 2,4 – 6,5%
- Maltose : 41 – 52%
- Maltotriose : 12,2 – 13%
- Maltotétraose : 2,1– 5,9%
- Maltopentaose : 1,3%
- Maltohexaose : 1,9%
- Dextrines : 11,5 – 23%

- ***Hydrate de carbone non fermentescible***

Il y a deux groupes d'hydrates de carbone non fermentescibles :

Les dextrines (α -glucanes) et polysaccharides C₄ à C₉ qui ont leur origine dans les liaisons α -1,6 de l'amidon. Les dextrines constituent de 20 à 30 % des substances solubles du moût.

Les β - glucanes et les pentosanes qui proviennent des gommages. Le moût en contient fort peu, de 200 à 300 mg/l soit 100 fois moins que de dextrines, Cependant, leur importance dans la fabrication est grande : elles jouent un rôle dans la viscosité et la filtrabilité.

Elles conduisent à des filtrations lentes surtout en filtration finale.

1.7.3.2. Matières azotées

La composition azotée typique d'un moût de brasserie à 12 % plato en mg d'azote par litre est :

- ***Acides aminés libres*** : 300 mg avec 100% de malt
225 mg avec 25 % de grains crus
150 mg avec 50% de grains crus

- **Peptides :** peptides de 2 à 30 unités d'acides aminés
300 mg /l avec 100% de malt
- **Protéines du moût :** 400 mg/l avec 100 % de malt

Les matières azotées totales du moût représentent environ 1000 à 1000 mg/l pour un moût pur malt.

1.7.3.3. Les lipides

Ils représentent de 10 à 30 mg/l.

1.7.3.4. Autres constituants

- **Matières minérales :**

Les constituants minéraux sont principalement:

Potassium	300 – 800 mg/l
Sodium	20 – 30
Calcium	25 – 30
Magnésium	70 – 140
Cuivre	0,1 – 0,2
Manganèse	0,15
Zinc	0,15
Fer	0,1
Sulfate (SO_4^{2-})	300
Soufre	90
Chlorure	45
Nickel	0.1
Fluor	0,6 – 0,9
SiO_2	100 – 230
MgO	90 – 230
Phosphate (PO_4^-)	550 – 900

- **Composés phénoliques**

Sous forme de polyphénols (2 à 300 mg/l) et d'anthocyanogènes 30 à 100 mg/l, de catéchine, ils sont en équilibre avec les protéines dans les associations protéines – tannins qui conditionnent la stabilité colloïdale [10].

La figure I.9 montre la composition du moût.

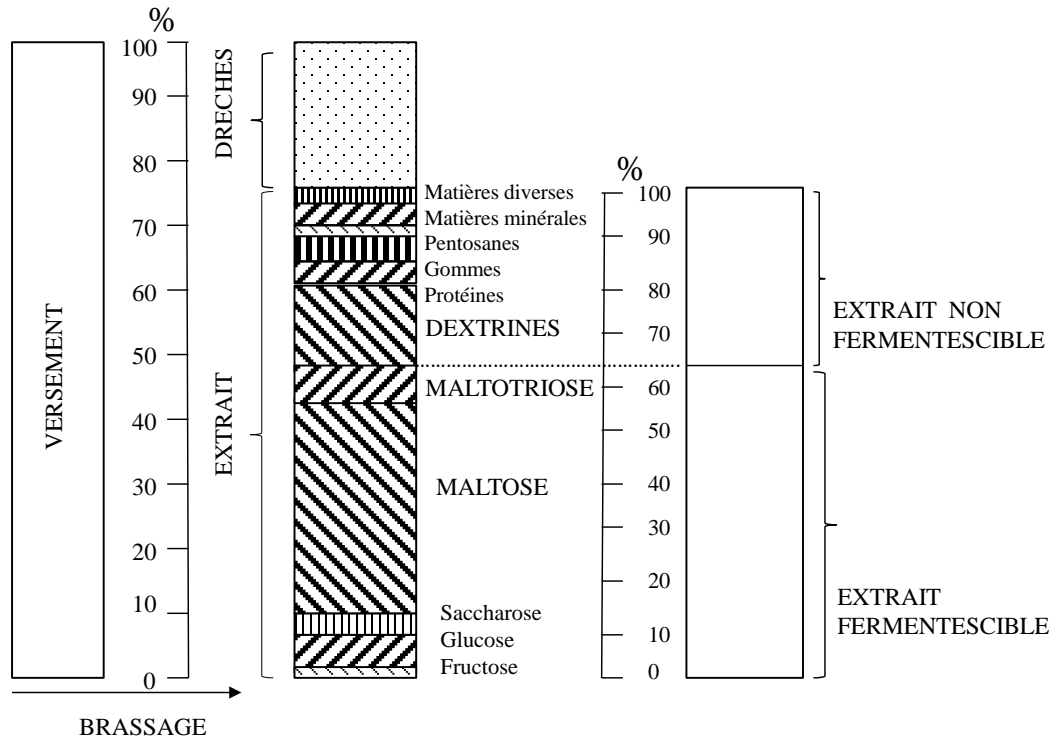


Figure I.9: Composition de l'extrait au brassage [10].

I.7.4. Contrôle qualité

Les principales déterminations analytiques sur le moût, sont [10] :

- ✓ Extrait
- ✓ pH
- ✓ Amertume

On y ajoute quelques fois :

- ✓ Viscosité
- ✓ Turbidité
- ✓ Azote total – azote coagulable
- ✓ Acides aminés libres
- ✓ Composition en hydrates de carbone
- ✓ β _glucanes
- ✓ Sels minéraux
- ✓ Polyphénols
- ✓ Acides gras libres
- ✓ DMS
- ✓ Hydrate de carbone

1.8. CLARIFICATION DU MOÛT

En fin de brassage, le moût à 100°C contient des matières en suspension (cassure) et des particules de houblon. Il est souhaitable de clarifier le moût dans le *whirpool* (décanteur) pour éliminer ces substances en suspension et en le refroidissant à une température de l'ordre de 7 à 10°C.

La clarification concerne deux types de troubles :

- ✓ Le trouble à chaud qui est essentiellement constitué par la cassure. Son élimination peut se faire par centrifugation ou par filtration.
- ✓ Le trouble à froid qui apparaît au fur et à mesure du refroidissement du moût. son élimination est souhaitable dans une limite maximale de 70 à 80%, car au-delà, les boissons ont souvent peu de goût.

1.9. REFROIDISSEMENT DU MOÛT

Le refroidissement du moût se fait dans les échangeurs à plaques entre les quelles circulent à contre-courant d'un côté le moût, et de l'autre le liquide réfrigérant. Ces appareils sont divisés en 2 zones :

- ***Première zone:***

Le moût est pompé vers le refroidisseur à 95 °C, il commence par être refroidi par l'eau glycolée, le calcul de l'appareil doit être fait de telle sorte que l'eau de refroidissement sorte de l'appareil à 80°C

- ***Seconde Zone:***

Cette zone dans laquelle on envoie de l'eau glycolée à - 4 °C, permet d'obtenir la température de moût désirée, soit 7 à 10°C.

Les appareils à plaques présentent des avantages certains : faible encombrement, récupération d'énergie très élevée, nettoyage en circuit fermé, problèmes bactériologiques nuls.

1.10. LA GARDE

La boisson produite n'a pas encore les propriétés organoleptiques requises pour être consommée. Elle subit une garde ou maturation. Cette étape favorise la dissolution du gaz

carbonique, la décantation de matières en suspension (précipités formés par des protéines et des substances amères du houblon) et l'affinage de la flaveur. La garde peut s'opérer entre 5 à 8°C.

I.11. LA FILTRATION

La filtration est l'étape qui termine la fabrication de la boisson, son but est triple:

- ✓ Clarifier la boisson pour la rendre translucide ;
- ✓ Diminuer la charge en micro-organismes, par retenue de la plus grande partie des bactéries éventuellement présentes
- ✓ Stabiliser la boisson par rétention des complexes protéines-polyphénols et des colloïdes qui formeraient rapidement un trouble, ainsi que les polysaccharides et les protéines peu solubles.

Au cours de la filtration, les bactéries sont retenues sur la base de mécanismes d'exclusion stérique, et les substances amères dissoutes par affinité chimique (absorption, précipitation) ou exclusion ionique (répulsion).

Le refroidissement de la boisson à 0 - 1°C avant et pendant la filtration est la clé d'une bonne stabilité colloïdale. La teneur en gaz carbonique est ajustée avant l'envoi de la boisson en tank de boisson filtrée.

I.12. CONSERVATION ET CONDITIONNEMENT

Après la filtration la boisson est destinée pour mise en bouteille ou s'effectuent plusieurs étapes :

- La laveuse : pour laver les bouteilles par soude caustique à une concentration bien déterminée.
- La soutireuse: pour le remplissage des bouteilles.
- Capsuleurs: pour mettre les bouchons aux bouteilles.
- La pasteurisation à 62°C : pour conserver le produit pendant 8 mois.
- Etiqueteuse : mise des étiquettes aux bouteilles.
- Dateur : pour mettre le jour et l'heure de production et la péremption.
- Mise en caisses.
- Stockage au magasin.

CHAPITRE II

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'APPROCHE

EXERGETIQUE

INTRODUCTION

Le fonctionnement de tout procédé s'effectue en présence d'irréversibilités. Ces irréversibilités se traduisent par une perte d'énergie noble ou mécanisable. Il est de la plus haute importance de localiser et quantifier ces pertes d'énergie noble de façon à pouvoir améliorer le fonctionnement du procédé.

La première partie de ce chapitre a pour but d'analyser les principaux modes de dégradation d'énergie associés au transfert de chaleur, au mélangeage, à la perte de charge et aux réactions chimiques.

L'analyse exergetique des procédés est une démarche qui se généralise actuellement. Elle est essentielle en vue de l'optimisation énergétique des procédés. Les notions d'exergie fortement liées aux dégradations d'énergie sont présentées et approfondies compte tenu de leur importance dans les applications industrielles.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée essentiellement à l'étude des travaux relatifs à l'analyse exergetique des procédés, et sera orientée plus particulièrement à l'industrie agro-alimentaire [12].

II.1. L'ANALYSE ENTROPIQUE

II.1.1. Objet de l'analyse Entropique

- ✓ Identification systématique de tous les éléments d'une unité industrielle, où se produisent des dégradations d'énergie susceptibles de réduction, en vue d'économiser de l'énergie.
- ✓ Classement des éléments précédents, dans l'ordre des importances quantitatives des dégradations produites, c'est-à-dire des espérances d'économies possibles, lors d'études économiques ultérieures.

II.1.2. Méthode

Elle consiste à effectuer, pour chaque élément de l'unité, le bilan entropique afin d'établir, par élément, la production horaire d'entropie qui servira au classement précédemment cité [14].

II.2. L'ENERGIE

II.2.1. Qualité de l'énergie et coût de son utilisation

Alors que le principe de conservation dans tout procédé industriel est établi, sa valeur utile en revanche se dégrade au cours de son utilisation. Cette dégradation peut être appréciée sous forme de chute de pression, de température de composition.

La somme algébrique des prix des énergies entrées et sorties fera apparaître un coût d'utilisation d'énergie pour l'atelier concerné. A l'échelle de l'usine, la somme des coûts d'utilisation d'énergie imputée à chaque atelier sera égale au coût total des énergies achetées par l'usine diminuée du coût total des énergies vendues, exprimée en unité d'énergie ou en dinars.

L'énergie rejetée dans le milieu ambiant est évidemment importante, elle peut receler parfois une valeur potentielle élevée. C'est pourquoi on la considère à tort comme gratuite lorsqu'on lui trouve une utilisation à l'intérieur de l'usine.

Cette analyse de l'utilisation de l'énergie peut être aussi fine qu'on le souhaite, puisque sa précision dépend de la taille de l'atelier étudié, allant d'un atelier pris dans sa globalité jusqu'à un appareil seul. En pratique, la nécessité de connaître toutes les entrées et sorties d'un atelier, parfois insuffisamment équipé en capteurs, conduit à réaliser une analyse assez fine des circuits et à recalculer tous les flux d'énergie.

A cette fin, nous allons rechercher une grandeur universelle qui décrive tous les types de dégradation d'énergie et permette de les comptabiliser [11].

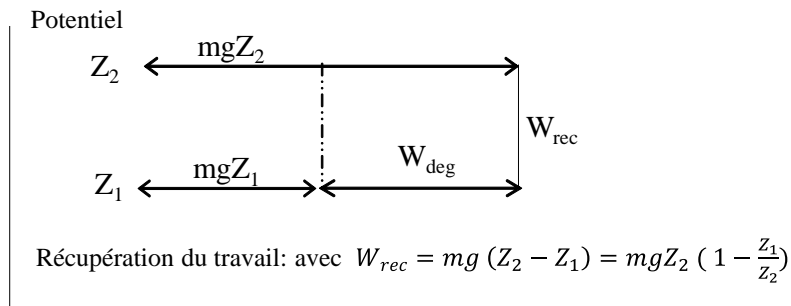
II.2.2. Mesure qualitative des dégradations d'énergies

Dans la pratique, les opérateurs suivent à la fois les débits mis en jeu et les chutes de pression, de température et de concentration pour conduire leur atelier. La baisse de ces grandeurs qualitatives témoigne de leur utilisation ou de leur dégradation. Ces observations permettent de calculer également des rendements, donc de comparer des appareils de type similaire. Pendant ce suivi a l'inconvénient de ne pas être quantitatif; il est donc préférable de travailler à partir du produit des grandeurs quantitatives avec les variations de grandeurs qualitatives. Cette nouvelle donnée fournira alors un suivi quantitatif des dégradations [11].

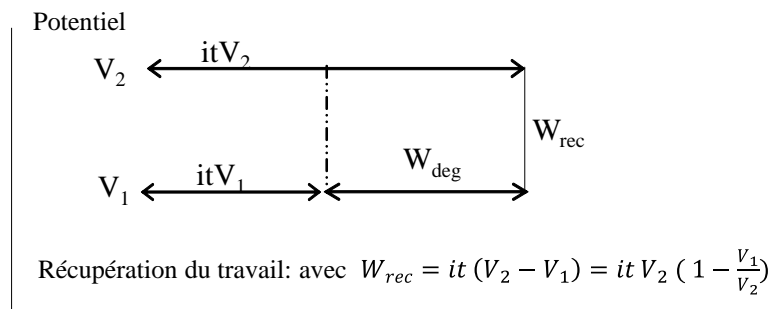
II.2.3. Mesure quantitative des dégradations d'énergies

Les trois exemples, représentés sur la figure II.1 illustrent des dégradations d'origine mécanique, électrique et thermique.

1) Travail d'origine mécanique



2) Travail d'origine électrique



3) Travail d'origine thermique

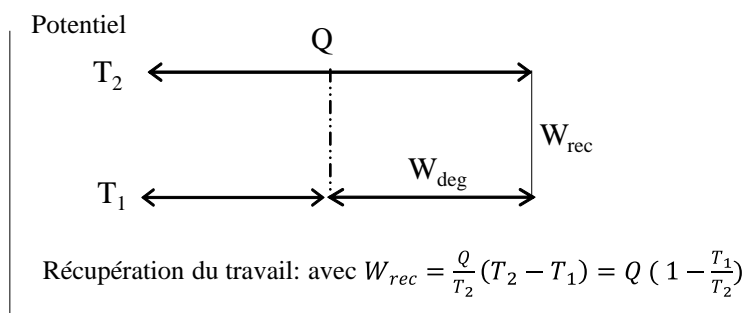


Figure II.1: Formes de récupération de travail [11].

Elles sont observées par les variations de potentiel Z_2 à Z_1 ; V_2 à V_1 , T_2 à T_1 respectivement. Dans chaque cas, la récupération de travail fait apparaître un facteur de Carnot de forme $\left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)$, dont la valeur dépend de l'origine des mesures de potentiel V .

II.2.4. Energie mécanique, électrique ou thermique

En l'absence de récupération, l'énergie mécanique ou électrique dissipée, est libérée dans le milieu ambiant sous forme d'une quantité de chaleur (Q égale au travail récupéré:Wr).

Elle représente une mesure de l'énergie dégradée en chaleur dans le milieu ambiant, donc perdue.

II.2.5. Energie calorifique

Cas de la machine thermique:

Si une quantité de chaleur Q est utilisée de T_2 à T_1 ($T_2 > T_1$), il est possible de récupérer le

travail max : $W_{12} = Q \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right)$

D'après le deuxième principe de la thermodynamique, cette valeur est égale à la différence entre le travail récupérable.

$$W_1 = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right) \text{ en utilisant } Q \text{ de } T_2 \text{ à } T_0$$

et

$$W_2 = Q' \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \text{ en utilisant } Q' \text{ de } T_1 \text{ à } T_0$$

Avec : $Q' = Q - \Delta W]_{T_1}^{T_2}$

Cette différence est représentée sur le schéma suivant par $\frac{Q}{T_2} (T_2 - T_1)$

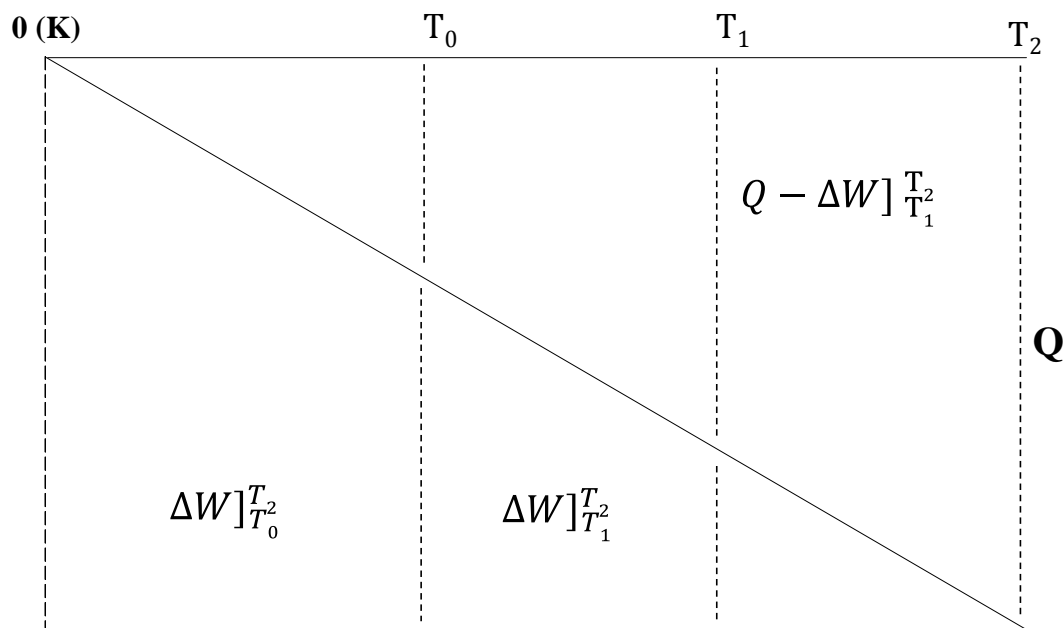


Figure II.2: Schéma du travail maximal récupérable entre T_2 et T_1 [11].

En l'absence de production de travail, la quantité de chaleur Q est conservée au cours du transfert thermique.

Les quantités de travail disponible avant et après transfert valent respectivement :

$$W_{d1} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right) \text{ et } W_{d2} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

Leur écart vaut : $W_{d1} - W_{d2} = T_0 Q \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$

Les termes Q/T_1 et Q/T_2 représentent l'entropie totale avant et après transfert, comme cette grandeur est conservative, la différence donne la valeur de l'entropie créée, soit :

$$S_{créée} = \left(\frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} \right) = \frac{Q}{T_1} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (II.1)$$

Le travail non récupéré ou dégradé apparaît donc comme le produit

$T_0 \left(\frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} \right) = T_0 S_{créée}$; que l'on peut écrire sous forme :

$$W_{dégradé} = \frac{T_0 Q}{T_1} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (II.2)$$

Donc le travail dégradé est inférieur au travail maximal récupérable entre T_2 et T_1

II.2.6 Types de dégradations

Les trois types de dégradations présentés ci-dessous, font apparaître la variation d'énergie d'une grandeur intensive (potentiel), comme suit [11] :

Forme d'énergie	mécanique	électrique	thermique
Potentiel	Z	V	T
Extensivité	mg	it	Q/T
Entropie créée	Q/T ₀	Q/T ₀	Q/T = S _{créée}

La grandeur extensive entropie est soit conservée, soit créée lors d'une utilisation respectivement réversible ou irréversible de ces énergies, donc elle constitue bien une mesure quantitative de la dégradation d'énergie.

II.4. LIEUX DE DEGRADATION D'ENERGIE

On observe deux formes d'espace sièges de dégradation d'énergie: l'intérieur et l'extérieur des surfaces fermées.

II.4.1. A l'intérieur des surfaces fermées

Une surface peut être une usine, un atelier ou un appareil dont les dégradations d'énergie seront accompagnées de variations de potentiel et apparaîtront sous forme de frottements, sans production de travail. Nous citons ci-dessous quelques exemples.

Frottements	Potentiel
Mécanique	Ecart de pression
Visqueux	Ecart de vitesse
Thermique	Ecart de température
Electrique	Ecart de potentiel
Concentration	Ecart de concentration
Réaction chimique	Ecart de d'affinité

II.4.2. A l'extérieur des surfaces fermées

La dégradation se fait sous forme de rejets dans le milieu ambiant. On peut citer parmi les rejets les plus répandus : les pertes thermiques, les fumées des cheminées, les eaux chaudes ou effluents chargés, les produits finis non conformes.

II.3. BILAN ENTROPIQUE

Le bilan de l'entropie créée est donc nécessaire et suffisant pour évaluer les dégradations d'énergie. L'entropie étant une fonction d'état, elle se calcule aisément à partir des débits de matière ou d'énergie et des potentiels correspondants aux débits véhiculés (température, pression, concentration, altitude, vitesse, potentiel chimique).

L'écriture du bilan de matière nécessite souvent un recoupement par bilan d'énergie, lorsque tous les débits de matières et d'énergie sont cohérents entre eux, les valeurs de potentiels mesurées ou calculées permettent d'établir le bilan exergetique qui en découle par la relation :

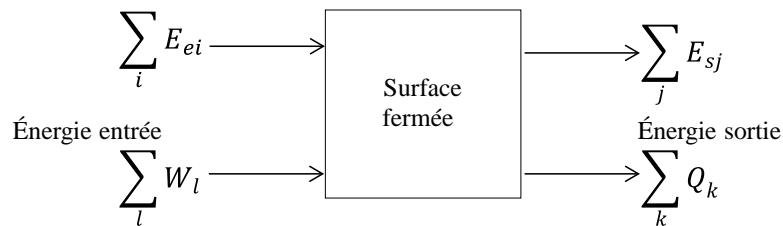
$$Ex_{détruite} = T_0 S_{créée} \quad (II.3)$$

Ainsi le coût de fonctionnement d'un appareil peut être évalué par le calcul de l'exergie détruite au sein de cet appareil, ce qui fait de cette mesure la grandeur universelle recherchée.

II.5. DEGRADATION D'ENERGIE A L'INTERIEUR D'UNE SURFACE FERMEE

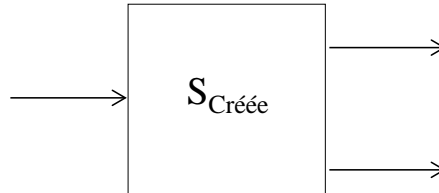
II.5.1. Bilan énergétique et exergie

La connaissance des débits d'énergie traversant la surface permet de calculer l'entropie véhiculée par ces énergies, ce qui peut être représenté par le schéma suivant [11]:



$$\sum_i E_{ei} + \sum_l W_l = \sum_j E_{sj} + \sum_k Q_k \quad (II.4)$$

Soit en termes d'entropie :



à T cte :

$$\sum_i S_{ei} + S_{créée} = \sum_j S_{sj} + \sum_k \frac{Q_k}{T} \quad (II.5)$$

En multipliant la seconde équation par $(-T_0)$, la somme de ces équations donne :

$$\sum_i E_{ei} - T_0 \sum_i S_{ei} - T_0 S_{cré} + \sum_l W_l = \sum_j E_{sj} + T_0 \sum_j S_{sj} + \sum_k Q_k \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (II.6)$$

et en définissant la fonction exergie par $Ex = E - T_0 S$ on aura :

$$\sum_i Ex_{ei} - T_0 S_{cré} + \sum_l W_l = \sum_j Ex_{sj} + \sum_k Q_k \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (II.7)$$

Les termes $\sum W$ et $\sum Q (1 - T_0 / T)$ représentent respectivement les énergies mécaniques ou électriques pures et des énergies mécaniques récupérables à partir d'énergie thermique.

Le terme $-T_0 S_{\text{créée}}$ apparaît comme un travail négatif, c'est-à-dire un travail sorti de la surface fermée, mais non produit, donc dégradé :

$$Ex_{\text{détruite}} = -T_0 S_{\text{créée}}$$

En notant par E , l'énergie totale, donnée par : $E = m (U + PV + gZ + \frac{V^2}{2})$

On obtient, pour la fonction exergie, la relation :

$$Ex = H + mgZ + \frac{mV^2}{2} - T_0 S \quad (II.8)$$

II.6. DEGRADATION D'ENERGIE A L'EXTERIEUR D'UNE SURFACE FERMEE

L'espace d'une usine peut être découpé en plusieurs surfaces fermées dont certaines, étant à la périphérie, seront en contact avec le milieu ambiant.

La somme des exergies détruites dans ces surfaces est obtenue par les mêmes équations précédentes, sachant que la somme des exergies entrées et sorties est connue (carburant, matières premières, produits finis, énergies diverses).

Cependant, d'autres exergies sont évacuées sous forme de rejets et font donc partie de la quantité totale d'exergie détruite.

II.7. CONSERVATION DE L'ENERGIE DANS LES SYSTEMES OUVERTS

II.7.1. Système ouvert

Toute conversion ou transfert d'énergie s'effectue généralement dans un domaine environnant. Ce domaine contient une certaine quantité de matière ou d'énergie, le domaine macroscopique associé au domaine sera appelé système thermodynamique.

On appellera aussi ce domaine, volume de contrôle [17].

Les systèmes les plus courants dans les applications pratiques restent toutefois les systèmes ouverts. Ces systèmes thermodynamiques échangent de l'énergie et de la matière avec l'extérieur. De nombreux exemples de tels systèmes existent en pratique, tels les ventilateurs, les turbines, les compresseurs, les échangeurs thermiques, les réacteurs chimiques, ou autres systèmes plus complexes : atelier, usine, etc...

Il est donc important de définir d'abord et avec précision le système à étudier et ses limites, puis à dresser les bilans des grandeurs attachées au système en liaison avec les flux d'autres grandeurs qui en traversent les parois.

II.7.2. Bilan énergétique d'un système ouvert en régime permanent

Le système dans son environnement sera schématisé par la figure II.3

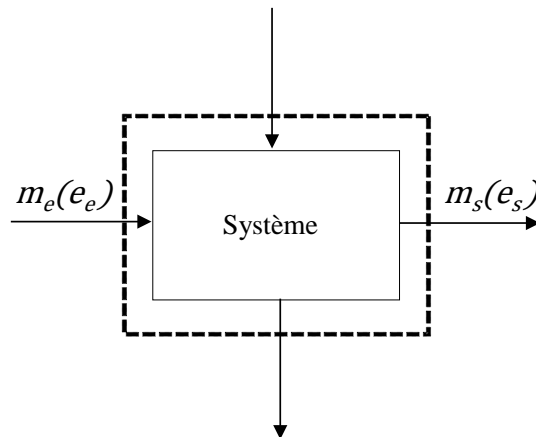


Figure II.3 : Bilan énergétique d'un système ouvert[12].

La conservation en régime établi des bilans massique et énergétique du système ouvert donne l'équation suivante

$$\sum_e m_e e_e + W_1 - \sum_s m_s e_s - Q = 0 \quad (II.9)$$

Avec :

m_e : Flux de matière à l'entrée du système portant l'énergie spécifique e_e

m_s : Flux de matière à la sortie du système portant l'énergie spécifique e_s

Q : Perte totale d'énergie thermique vers l'environnement à la température T_0

W_1 : Energie non thermique (mécanique, électrique,...) reçue par le système

e : étant l'énergie spécifique totale définie par

$$e = h + gz + \frac{v^2}{2} \quad (II.10)$$

Les densités d'énergie $\frac{v^2}{2}$ et gz , représentent respectivement l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

II.7.3. Insuffisance du bilan énergétique

Le bilan de conservation d'énergie établit simplement l'équivalence de l'énergie reçue et de la chaleur perdue ; il met en quelque sorte sur le même plan les deux énergies mécanique et thermique. Cependant, on constate que s'il y a égalité quantitative des diverses formes d'énergie, la qualité des différentes formes d'énergie varie d'une forme à l'autre.

Ainsi, une mégajoule d'énergie thermique à 1000 °C ne représente pas le même potentiel énergétique à 20 °C. De même, le potentiel d'utilisation d'une mégajoule d'énergie mécanique, apparaît rapidement différent du potentiel d'utilisation d'une mégajoule d'énergie thermique.

En effet, si l'énergie mécanique peut être spontanément transformée en énergie thermique (par frottements par exemple), la transformation inverse, non spontanée nécessite de procéder selon un schéma très précis.

Ce sont tous ces éléments, liés à la qualité de l'énergie et aux processus de transfert et de transformation de l'énergie qui constituent le deuxième principe de la thermodynamique, considéré comme un principe d'évolution.

II.8. BILAN ENTROPIQUE D'UN SYSTEME OUVERT

La grandeur physique liée au principe d'évolution est l'entropie, dont on observe la création dès que des opérations ont lieu en dehors de l'équilibre strict, c'est-à-dire pour toutes les opérations industrielles qui nécessairement doivent présenter une certaine cinétique pour avoir lieu en un temps fini.

II.8.1. Entropie d'un système ouvert

L'entropie est une grandeur qui caractérise l'énergie thermique. Il s'agit d'une grandeur d'état extensive, additive, et elle est nulle à 0 K pour tous les corps parfaitement cristallisés.

- Lorsqu'un système échange de la chaleur δq à T (uniforme), son entropie varie de la quantité :

$$dS = \frac{\delta q}{T} \quad (II. 11)$$

Lorsqu'un système reçoit du travail (énergie mécanique ou électrique), l'entropie du système peut croître, ou rester constante, mais sûrement jamais décroître.

Cette variation d'entropie est souvent désignée par l'expression « entropie créée » :

$$dS = \delta S_{créée} \geq 0 \quad (II.12)$$

L'entropie créée à T donnée est reliée au travail dégradé δW par :

$$\delta S_{créée} = \frac{\delta W_{dégradé}}{T} \quad (II.13)$$

Cette notion de travail dégradé peut souvent être reliée à la chaleur créée par frottements. C'est l'exemple de deux disques frottant l'un sur l'autre et plongés dans un réservoir d'eau. L'eau s'échauffe comme si le travail δW (produit un $\delta q = \delta W$ et donc crée une variation d'entropie dS) telle que:

$$dS = \frac{\delta q}{T} = \frac{\delta W}{T} \quad (II.14)$$

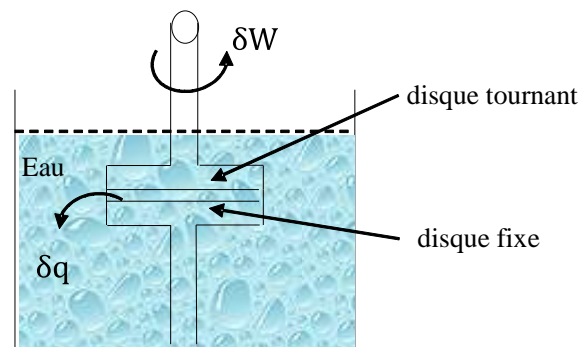


Figure II.4 : Création d'entropie par frottement de deux disques[12].

Soit :

$$dS = \delta S_{créée} = \frac{\delta W_{dégradé}}{T} \quad (II.15)$$

Les phénomènes vraiment « réversibles » ne sont pas créateurs d'entropie. Aucune transformation réelle n'est réversible, mais il existe des cas où l'on peut s'en approcher (les phénomènes très lents en particulier).

- Lorsqu'un système reçoit chaleur et travail simultanément, la variation d'entropie s'écrit :

$$dS = \frac{\delta q}{T} + \delta S_{créee} \quad (II.16)$$

II.8.2. Rendement d'une machine motrice à deux sources de chaleur

Le rendement d'une transformation d'énergie à deux sources de chaleur, représentée en figure II.5, est égale au rapport de l'énergie utile (W) à l'énergie thermique (Q_1) que doit fournir la source chaude. En appelant η_M ce rendement, la définition précédente permet d'écrire :

$$\eta_M = \frac{W}{Q_1} \quad (II.17)$$

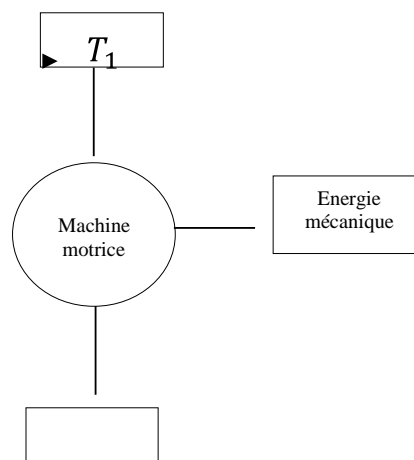


Figure II.5: Schéma d'une machine motrice à deux sources de chaleur[12].

Comme

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (II.18)$$

On aura

$$\eta_M = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (II.19)$$

Soit

$$\eta_M = \left[1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right] \quad (II.20)$$

D'après le deuxième principe de la thermodynamique, les entropies totales avant et après transfert sont données par :

$$\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1} \text{ et } \Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} \quad (II.21)$$

Comme cette grandeur est conservative, la différence donne l'entropie créée, soit :

$$\Delta S_{créee} = \left[\frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} \right] \geq 0 \quad (II.22)$$

Pour un mode réversible de la transformation on a :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (II.23)$$

D'où, le rendement réversible de cette machine motrice sera :

$$\eta_{MR} = \left[1 - \frac{T_2}{T_1} \right] \quad (II.24)$$

η_{MR} est appelé aussi le rendement de Carnot

Dans le cas du mode irréversible on aura:

$$\frac{Q_1}{Q_2} < \frac{T_1}{T_2} \quad (II.25)$$

Soit : $\eta_M < \eta_{MR}$

η_M est toujours inférieur à η_{MR}

Ce résultat montre que l'efficacité maximale de cette machine motrice fonctionnant entre deux sources de chaleurs à deux températures différentes sera égale au rendement de Carnot.

II.8.3. Production d'entropie dans un système ouvert

Il y lieu dans ce cas de tenir compte des transferts d'entropie liés au transfert de matière comme le montre la figure II.6.

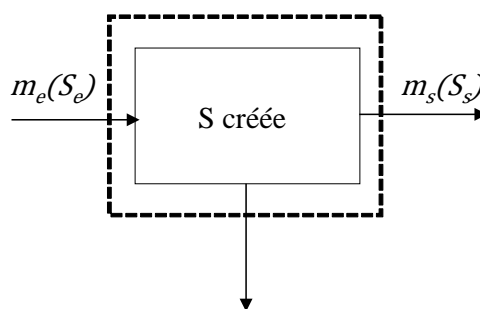


Figure II.6: Bilan entropique du système ouvert [12].

En effet à toute matière est associée une entropie spécifique S , en conséquence le bilan entropique d'un système ouvert recevant des flux de matière s'écrit :

$$\left[\sum_e m_e S_e - \sum_s m_s S_s \right] - \frac{Q}{T_0} + S_{créée} = 0 \quad (II.26)$$

Le flux d'entropie créée ($S_{\text{créée}}$) peut provenir de différentes formes d'irrégularités recensées pour le système.

II.8.4. Réversibilité et Irréversibilité

L'évaluation détaillée de l'évolution de l'entropie dans un système, au cours d'une transformation thermodynamique, permet de cerner les pertes dues à toute imperfection traduisant un écart par rapport à la transformation parfaite. Une transformation thermodynamique est dite réversible si elle est parfaite, c'est-à-dire si elle conserve l'entropie. Il n'y a pas alors de dégradation d'énergie, de sorte que toutes les formes d'énergie se comportent de façon identique. Toutes les variables d'extensivité se conservent. Une transformation réversible apparaît comme une transformation idéale, inaccessible en pratique. La transformation irréversible est en fait une transformation réelle. Elle est définie par opposition à la précédente et entraîne une création d'entropie. Pour bien comprendre et déceler l'origine de l'énergie dégradée, il est nécessaire de bien comprendre les phénomènes physiques qui constituent les causes d'irrégularités.

Nous citonsci-dessous quelques exemples fondamentaux des processus irréversibles :

✓ *Mélangeage et homogénéisation des températures*

Le mélange de deux fluides qui ne diffèrent que par la température est une opération irréversible, correspondante à une entropie créée.

On mélange deux débits m_1 et m_2 du même fluide (*figure II.7*), pris respectivement à T_1 et T_2 .

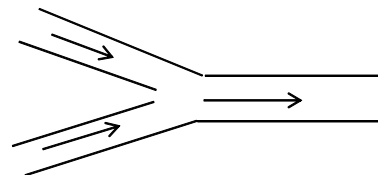


Figure II.7: Création d'entropie par homogénéisation de deux fluides[12].

La conservation de la quantité de chaleur échangée entre les fluides, donne la température T_3 :

$$T_3 = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{(m_1 + m_2)} \quad (II.27)$$

Le bilan entropique de ce système donne l'entropie créée :

$$S_{créée} = C_p \left[m_1 \ln \frac{T_1}{T_3} + m_2 \ln \frac{T_2}{T_3} \right] \quad (II. 28)$$

le C_p du fluide est supposé indépendant de la température.

✓ *Transfert de chaleur et gradient de température*

On sait que la chaleur passe spontanément des corps chauds aux corps froids. Ce phénomène irréversible donne lieu à une création d'entropie dont la valeur est facile à établir grâce aux deux bilans du 1^{er} et 2^{ème} principe.

Un corps chaud, à température T_1 est mis en contact avec un corps froid, à température T_2 , Pendant un certain temps, une quantité de chaleur δq passe du corps chaud au corps froid (par conduction, convection ou rayonnement), l'entropie créée se réduit à la somme des variations d'entropie du corps chaud et du corps froid, soit :

$$\delta S_{créée} = - \frac{\delta q}{T_1} + \frac{\delta q}{T_2} = \frac{\delta q (T_1 - T_2)}{T_1 T_2} \quad (II. 29)$$

Cette grandeur est toujours positive car δq est bien du signe de $(T_1 - T_2)$

✓ *Perte de pression du fluide due aux frottements*

On considère l'écoulement isenthalpique d'un fluide dans une conduite indéformable (figure II.8).

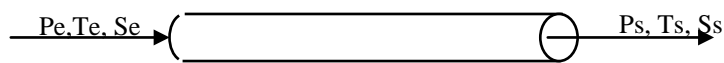


Figure II.8: Création d'entropie due à la perte de charge de l'écoulement d'un fluide [12].

L'existence des pertes de charge dues à la viscosité et à la turbulence se traduit par :

$$P_s = P_e - \Delta P \quad (II. 30)$$

Le bilan d'entropie s'écrit :

$$S_{créée} = m(S_s - S_e) \quad (II. 31)$$

Sachant que l'écoulement est isenthalpique, l'équation (II.31) peut encore s'écrire :

$$S_{créée} = -m \int_{P_e}^{P_s} \frac{v dP}{T} \quad (II.32)$$

✓ Réaction chimique

Les réactions chimiques courantes sont des réactions irréversibles car leur sens d'évolution est unique dans le temps. Il en est ainsi par exemple dans toute combustion. Sous certaines conditions toutefois, on rencontre des réactions équilibrées dans lesquelles des variations infinitésimales d'un paramètre déplacent l'équilibre dans un sens ou le sens opposé. L'entropie créée lors d'un avancement $d\xi$ d'une réaction chimique (figure II.9) est proportionnelle à $d\xi$ et à l'affinité A de la réaction, elle-même définie à l'aide des coefficients stœchiométriques ν_i et des potentiels chimiques g_i des constituants par :

$$\delta S_{créée} = \frac{A}{T} d\xi \quad (II.33)$$

Pour certaines valeurs de pression, de température ou de concentration des produits de la réaction, A peut s'annuler, ce qui correspond à l'arrêt de la création d'entropie c'est-à-dire à l'équilibre chimique.

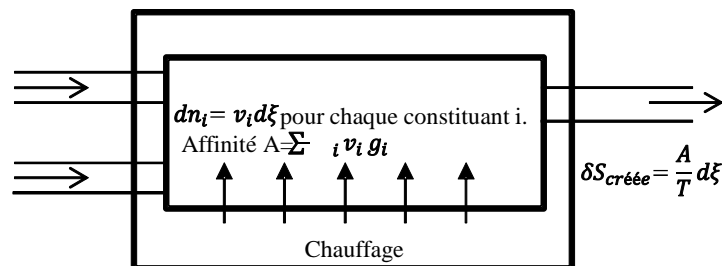


Figure II.9:Création d'entropie d'une réaction chimique[12].

✓ Création de surface

Le broyage d'un solide en particules plus fines, la dispersion d'un liquide en gouttelettes ou un gaz en bulles, sont des opérations qui demandent un apport d'énergie mécanique.

$$dE = \sigma dA \quad (II.34)$$

Où σ est la tension superficielle et dA est l'aire créée.

Le rendement énergétique de ces opérations est généralement très faible. Les énergies ainsi calculées par l'équation (II.34) sont des minimums théoriques. Dans le cas pratique, il faut

dépenser une énergie mécanique qui est de l'ordre de 10 à 100 fois cette valeur minimale (Le Goff, 1980 b).

II.9. ANALYSE EXERGETIQUE DES SYSTEMES OUVERTS EN REGIME PERMANANT

La création d'entropie a servi aux scientifiques pour mesurer la dégradation de l'énergie, causée par les irréversibilités des transferts et des transformations énergétiques. Cependant, pour l'ingénieur habitué à raisonner en termes énergétiques, donc en joules ou kWh, cette mesure n'est pas pratique.

En effet, l'entropie ou son évolution dans le temps se mesure en unité d'énergie par Kelvin ($J.K^{-1}$). Ce fait constitue au moins l'une des raisons de l'intérêt de l'emploi de la notion d'exergie pour traiter de ces problèmes de dégradations d'énergie [18].

II.9.1. Théorème de Gouy-Stodola et travail dégradé

En considérant le système thermodynamique ouvert (*figure II.3*), dont la frontière est conventionnellement à une température T_0 non affectée par les transferts thermiques (milieu extérieur), les transferts sont assurés par des écarts de températures supposées localisées à l'intérieur du volume de contrôle.

Par élimination de Q entre les équations (II.9) et (II.26), il vient :

$$W = \sum_s m_s (e_s - T_0 s_s) - \sum_e m_e (e_e - T_0 s_e) + T_0 S_{créée} \quad (II. 35)$$

si le système fonctionne réversiblement, cela conduit à :

$$W_r = \sum_s m_s (e_s - T_0 s_s) - \sum_e m_e (e_e - T_0 s_e) \quad (II. 36)$$

Il en résulte que

$$W = W_r + W_{dég} \quad (II. 37)$$

W_r : travail réversible, correspond soit au travail minimum à fournir au système, soit au travail maximum cédé à l'extérieur par le système.

W_p : correspond au travail dégradé ou perdu dans le système, soit :

$$W_p = T_0 S_{créée} \quad (II. 38)$$

Ceci constitue l'essence du théorème de Gouy- Stodola (1910) et montre le lien entre le travail dégradé et la création d'entropie, à savoir la température de référence T_0 .

L'usage courant veut que la température de référence soit la température ambiante conventionnelle de 25°C ou 298,15 K. Le Goff [19] suggère de choisir la température de référence qui facilite les calculs pour le bilan d'exergie. Il montre par ailleurs que la performance exergétique d'un système ouvert quelconque est indépendante de la température de référence choisie.

II.9.2.Exergie

L'exergie a été introduite par Rant (1956), comme étant le travail disponible dans un fluide se trouvant dans un état de non équilibre avec les conditions de référence (T_0, P_0). Auparavant, Gouy (1889) l'appelait «énergie utilisable» et Keenan (1932) utilisait le terme "*availability*". L'exergie utilisée dans l'analyse des systèmes énergétiques, des cycles thermodynamiques et des machines thermiques, peut être aussi utilisée comme un outil d'investigation des procédés chimiques et technologiques.

Ainsi, Szargut et coll[27] définissent l'exergie comme étant la quantité d'énergie mécanisable qu'il est possible d'obtenir avec de la matière qui est portée, dans la transformation réversible mise en œuvre, à l'équilibre thermodynamique avec les composants naturels de l'environnement avec lesquelles elle interagit et uniquement avec ceux-ci.

De ce point de vue général [16] et Szargut et Coll [27] définissent diverses formes de l'exergie (Ex) qui est une grandeur extensive additive.

$$Ex = Ex_c + Ex_p + Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (II.39)$$

Ex_c :exergie cinétique ; Ex_p :exergie potentielle ; Ex_{ph} :exergie physique ; Ex_{ch} :exergie chimique.

II.9.3. Différentes formes d'exergie

II.9.3.1. Exergie cinétique et potentielle

Les énergies cinétiques et potentielles des fluides sont deux formes d'énergie ayant la totale faculté de fournir un travail mécanique ou son équivalent. Leur évaluation exergetique par rapport au niveau des données de référence donne [12]:

$$Ex_c = m \frac{v_0^2}{2} = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (II.40)$$

$$Ex_p = m g z_0 \quad (II.41)$$

Avec : v_0 : vitesse moyenne du fluide par rapport à la surface de la terre
 z_0 : altitude du fluide au-dessus du niveau de la mer

II.9.3.2. Exergie physique

L'exergie physique représente le travail que peut fournir une certaine quantité de matière lors d'un processus réversible d'un état initial (T, P) à un état final déterminé par les paramètres de l'environnement (T_0 , P_0).

Le bilan d'énergie et d'entropie du système de la figure (II.10) donne les équations suivantes [16] :

$$Q_0^{rev} - W^{rev} = (H_0 - H) \quad (II.42)$$

$$Q_0^{rev} = T_0(S_0 - S) \quad (II.43)$$

En éliminant Q_0^{rev} entre ces deux équations, on obtient :

$$W^{rev} = Ex_{ph} = (H - T_0 S) - (H_0 - T_0 S_0) \quad (II.44)$$

$$\text{Soit } W^{rev} = Ex_{ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (II.45)$$

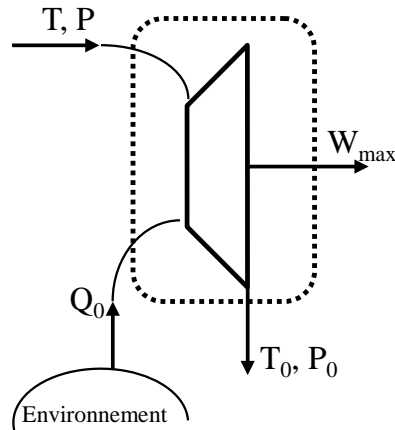


Figure II.10: Travail maximal d'un processus physique réversible

II.9.3.3. Exergie chimique

L'exergie chimique est le travail que peut fournir une quantité de matière, si elle était amenée de (T_0, P_0) à un état d'équilibre thermodynamique avec les composants communément présents dans l'environnement naturel.

Considérons la réaction chimique réversible se déroulant à (T_0, P_0) indiquée sur la figure (II.11):

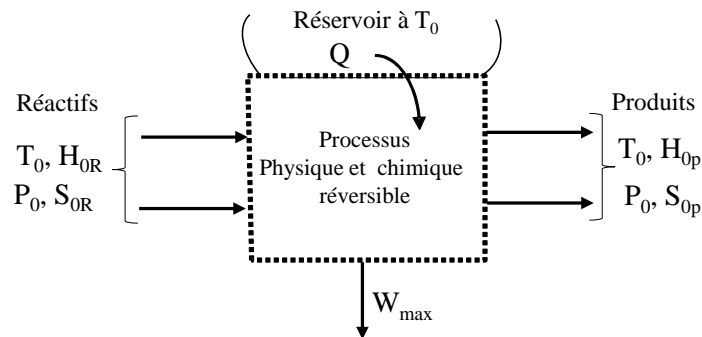


Figure II.11: Réaction chimique réversible à (T_0, P_0) [16]

D'après le premier et le second principe de la thermodynamique on a :

$$Q - W_{max} = H_{0P} - H_{0R} \quad (II.46)$$

et

$$Q = T_0(S_{0P} - S_{0R}) \quad (II.47)$$

La combinaison de ces deux équations donne :

$$W_{max} = (H_{0P} - T_0 S_{0R}) - (H_{0P} - T_0 S_{0R}) \quad (II.48)$$

En définissant la fonction de Gibbs par :

$$G = H - TS \quad (II.49)$$

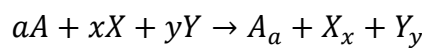
la variation de l'enthalpie libre de la réaction s'écrit:

$$\Delta G^0 = G_P - G_R \quad (II.50)$$

Soit pour le travail maximal fourni vers le milieu extérieur :

$$W_{max} = -\Delta G^0 \quad (II.51)$$

Se basant sur l'équation (II.51), la variation d'exergie standard associée à la réaction de formation du composé $A_aX_xY_y$ à (P_0, T_0) , est [20,27] :



$$e_{xch}^0(A_aX_xY_y) - ae_{xch}^0(A) - xe_{xch}^0(X) - ye_{xch}^0(Y) = \Delta G_f^0(T_0) \quad (II.52)$$

Soit pour l'exergie standard du composé $A_aX_xY_y$:

$$e_{xch}^0(A_aX_xY_y) = \Delta G_f^0(T_0) + ae_{xch}^0(A) + xe_{xch}^0(X) + ye_{xch}^0(Y) \quad (II.53)$$

L'équation (II.53) montre que l'exergie d'un composé $A_aX_xY_y$ peut être calculée à partir de son enthalpie libre de formation et les exergies standard des éléments simples (A, X et Y).

Pour l'évaluation de l'exergie standard de l'élément A, l'équation (II.53) s'écrit sous la forme alternative :

$$e_{xch}^0(A) = \frac{1}{a} [e_{xch}^0(A_aX_xY_y) - xe_{xch}^0(X) - ye_{xch}^0(Y) - \Delta G_f^0(T_0)] \quad (II.54)$$

Par ailleurs, si $A_aX_xY_y$ est le composé de référence pour le calcul de l'exergie standard de l'élément A, cela suppose qu'il est totalement en équilibre avec l'environnement, et par conséquent son exergie sera nulle.

d'où :

$$e_{xch}^0(A) = \frac{1}{a} [-xe_{xch}^0(X) - ye_{xch}^0(Y) - \Delta G_f^0(T_0)] \quad (II.55)$$

En choisissant le composé de référence suivant des critères bien définis, propres à chaque auteur, Kameyama et Coll, [20] et Szargut et Coll, [27] ont ainsi tabulé les exergies standard d'un nombre important de composés solides et gazeux. L'exergie standard d'un composé i de l'air est calculée par les équations (II.56 -II.58) en fonction de sa pression partielle dans le

mélange. Le tableau (II.1) donne la composition de référence de l'air supposé saturé en vapeur d'eau à $T = 25^\circ\text{C}$ et $P = 1 \text{ atm}$ [20].

L'exergie du composé i dans le mélange est :

$$e_{xchi} = e_{xchi}^0 + RT_0 \ln a_i \quad (\text{II.56})$$

En supposant l'air comme un mélange idéal de gaz parfaits, on aura :

$$e_{xchi} = e_{xchi}^0 + RT_0 \ln \frac{P_{i0}}{P_0} \quad (\text{II.57})$$

Comme $e_{xchi} = 0$, on obtient :

$$e_{xchi}^0 = RT_0 \ln \frac{P_{i0}}{P_0} \quad (\text{II.58})$$

Tableau II.1 : composition de référence de l'air [20].

Composé (i)	O ₂	N ₂	Ar	He	Ne	CO ₂	H ₂ O
Pression (atm)	0,2034	0,7557	0,00901	$5,24 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,0316

II.9.4. Bilan d'exergie d'un système ouvert en régime permanent

L'analyse exergétique débouche sur une comptabilité qui englobe le premier et le deuxième principe de la thermodynamique. Seule cette forme de comptabilité permet d'évaluer qualitativement et quantitativement les dégradations d'énergie.

L'écriture d'un bilan d'exergie en régime permanent est identique à celle d'un bilan d'énergie, à une différence essentielle près : l'énergie est conservée alors que l'exergie peut être détruite (consommée) de sorte que le bilan doit contenir un terme d'exergie perdue (Ex_d).

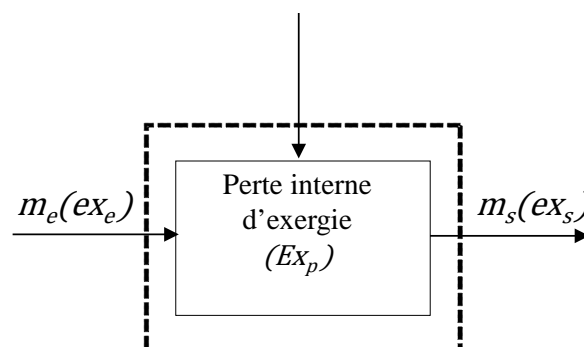


Figure II.12: Bilan exergétique du système ouvert [12].

En définissant la fonction exergie par les équations données ci-dessus, le bilan exergétique de la figure (II.12) donne :

$$\sum_e m_e E_{Xe} - \sum_s m_s E_{Xs} + W_l - T_0 S_{créée} \quad (II.59)$$

cette équation de bilan exergetique comprend trois termes :

- ✓ Une fonction thermodynamique (Ex) appelée exergie spécifique associée à la matière ;
- ✓ Un terme correspondant aux énergies nobles (électrique, mécanique, cinétique et potentielle), dont l'exergie correspondante est dite exergie pure et donnée par W_l
- ✓ Une exergie perdue ou détruite Ex_d , correspondant à la création d'entropie due aux différentes irréversibilités du système est égale à $T_0 S_{créée}$.

Ainsi, l'exergie s'avère un outil très efficace pour l'analyse et l'optimisation d'un processus thermodynamique. Un processus est thermodynamiquement idéal s'il ne s'y produit aucune perte d'exergie, et il s'écarte de l'idéal thermodynamique dans la mesure où de l'exergie est consommée.

L'optimisation thermodynamique implique donc une conservation d'exergie et non d'énergie, parce que conformément au premier principe, l'énergie n'est jamais consommée ou détruite. Ainsi, l'amélioration et l'optimisation d'un procédé énergétique peuvent être mieux guidées par la détermination des sources et des grandeurs de ses pertes d'exergie [17,18].

II.10. PERTES EXERGETIQUES D'UN PROCÉDE INDUSTRIEL

Les pertes exergetiques d'un procédé industriel, ayant pour objectif la fabrication d'un produit fini fonctionnel, peuvent être calculées en supposant le modèle de la figure (II.13)

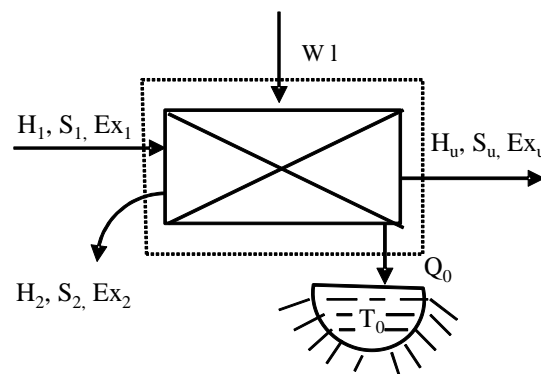


Figure II.13: Perte exergetique d'un procédé industriel[12].

II.10.1 Perte interne d'exergie

Le flux exergetique du produit fonctionnel utile pour le procédé réel est :

$$Ex_u = (Ex_1 - Ex_2) + W - T_0 S_{créée} \quad (II.60)$$

Si ce procédé est supposé réversible, on aura :

$$Ex_u^{rev} = (Ex_1 - Ex_2) + W \quad (II.61)$$

En supposant les mêmes quantités d'exergie Ex_1 , Ex_2 et W pour ces deux cas de procédé, on aura :

$$Ex_u^{rev} - Ex_u = T_0 S_{créée} \quad (II.62)$$

Cette équation montre nettement que le potentiel exergetique du produit fonctionnel, fabriqué dans un procédé réversible, est supérieur à celui dans le cas du procédé réel irréversible. Leur différence est égale à la perte interne d'exergie.

L'irréversibilité associée à cette perte interne d'exergie est un ensemble de différentes formes d'irréversibilités en interaction, tels que le mélange des réactifs, la réaction chimique spontanée, la perte de charge du fluide et le transfert de chaleur à travers une différence finie de température.

Brodyanski et Coll, [21] ont identifié deux formes de perte interne d'exergie: les pertes techniques et celles de structure. La perte d'exergie technique est due à l'imperfection de certaines parties de l'installation et peut s'atténuer avec l'amélioration de celle-ci. Ces imperfections peuvent correspondre par exemple à une surface limitée d'échange, une mauvaise isolation thermique, une perte de charge dans les conduites, un écoulement de fluide non adéquat.

Quant à la perte d'exergie de structure, elle ne peut pas diminuer substantiellement si on ne change pas le principe de la structure du procédé. Par exemple, la grande différence de capacité calorifique entre deux fluides dans un échangeur de chaleur. Si on augmente indéfiniment la surface d'échange, on ne peut pas diminuer la différence de température des fluides à l'une des extrémités de l'échangeur. Ceci nécessitera l'introduction et l'utilisation d'un autre fluide de bonne capacité calorifique.

II.10.2 Perte externe d'exergie

La majorité des procédés industriels sont caractérisés par la production de sous-produits rejetés vers l'environnement. Les paramètres d'état P,T et la composition de ces sous-produits différent de celles de l'environnement. Ainsi, ces sous-produits véhiculent des exergies positives qui se dissipent dans l'environnement, elles représentent donc une perte externe d'exergie.

En supposant les mêmes quantités d'exergie Ex_1 , Ex_2 et W pour les deux cas de procédé mentionnés ci-dessus, on aura pour le flux d'exergie du sous produit Ex_2 .

$$(Ex_2^{rev} - Ex_2) = T_0 S_{créée} \quad (II.63)$$

De même, cette équation montre que le potentiel exergetique du sous-produit dépend essentiellement de la nature du processus réalisé à l'intérieur de l'installation. Aussi, indique-

t-elle clairement que la récupération et la réutilisation des exergies, des sous-produits et des rejets, peut receler parfois une valeur potentiellement importante si on réduit la perte interne d'exergie.

II.10.3. Efficacité exergetique

Pour caractériser la performance exergetique du procédé étudié, on fait appel généralement à la notion de l'efficacité exergetique, définie par le rapport de la somme des exergies sortantes à la somme des exergies entrantes [22].

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_u + Ex_2}{Ex_1 + W} \quad (II.64)$$

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{T_0 + S_{créée}}{Ex_1 + W} \quad (II.65)$$

II.11. ANALYSE DES TRAVAUX RELATIFS A L'APPROCHE EXERGETIQUE DES PROCÉDES

Un procédé industriel est un système complexe, comprenant un ensemble de processus élémentaires d'opérations unitaires telles que l'échange de chaleur, la réaction chimique, l'écoulement des fluides, le mélange et la séparation des constituants.

L'objectif de cette partie est de réaliser une synthèse bibliographique des principaux résultats obtenus lors de l'application de l'analyse exergetique à ces différents processus ainsi qu'à ceux de l'industrie agro-alimentaire.

II.11.1. Echangeur de chaleur

Bejan [23] a montré qu'il existe dans l'échangeur de chaleur deux phénomènes irréversibles, donc deux sources de création d'entropie : la perte de pression dans chaque fluide, due aux frottements ; et la différence de température entre fluides, due au transfert lui-même. De ce fait, le flux de production d'entropie générée par les irréversibilités est essentiel dans l'analyse et la conception des échangeurs de chaleurs, il détermine la qualité du transfert d'énergie thermique dans le procédé.

Une approche réaliste de la conception de ces systèmes doit se baser sur le minimum de production d'entropie [24]. Plusieurs investigateurs utilisent différentes formes de l'entropie comme paramètre d'évaluation. Le concept le plus fréquemment utilisé est le nombre de production d'entropie N_s , proposé par Bejan[23], c'est un nombre adimensionnel exprimant le rapport du flux de production d'entropie réel au débit de capacité calorifique (mC_p),

$$\text{soit : } N_s = \frac{S_{créée}}{mC_p} \quad (II.66)$$

Soit pour un échangeur adiabatique à contre-courant :

$$N_s = \left[\ln \frac{T_{1s}}{T_{1e}} + \ln \frac{T_{2s}}{T_{2e}} \right] - \frac{r}{C_p} \left[\ln \frac{P_{1s}}{P_{1e}} + \ln \frac{P_{2s}}{P_{2e}} \right] \quad (II.67)$$

Les valeurs de N_s peuvent varier de 0 à l'infinie. De grandes valeurs de N_s correspondent aux conditions d'importante production d'entropie, due aux irréversibilités du transfert thermique et de perte de charge. Le nombre de production d'entropie a été largement utilisé pour évaluer la performance des échangeurs de chaleur à deux fluides.

Dans un échangeur de chaleur donné, la production d'entropie peut être influencée par la variation de l'écoulement du fluide. En utilisant différents promoteurs de turbulence de l'écoulement, Bejan[25] montre que l'augmentation de la vitesse d'écoulement diminue usuellement la résistance de transfert thermique, mais augmente en contre partie la perte de charge. Cet auteur montre que pour une surface fixe d'échange de chaleur, la minimisation de

la production d'entropie dans le système (optimum thermodynamique) est possible en choisissant des paramètres géométriques de conception adéquats.

Se basant sur les relations de réciprocité d'Onsager, Tondeur et Kvaalen [26] montrent que pour une surface d'échange donnée, la bonne configuration d'un échangeur de chaleur ou d'un contacteur en général, est celle qui présente une distribution uniforme du flux de production d'entropie local dans le système. En conséquence, pour une perte de charge donnée, la bonne configuration de l'échange de chaleur sera fortement liée à l'uniformité de la force motrice $\Delta(1/T)$ le long de l'échangeur.

L'étude des échangeurs de chaleur à courants croisés a été conduite par Sekulic [28]. Il examine la qualité du transfert d'énergie dans l'échangeur, sur la base du 2ème principe de la thermodynamique. En négligeant les pertes de charge dans l'échangeur, cet auteur montre que pour une surface d'échange de chaleur constante, la qualité du transfert d'énergie dépend de différents paramètres opératoires tels que le rapport des températures des fluides à l'entrée, le rapport des débits de capacité calorifique et l'efficacité thermique de l'échangeur.

II.11.2. Réacteur chimique

La synthèse des résultats de l'analyse exergetique de différents procédés chimiques, résumé par Dunbar et Lior [29] montre que 65 à 90% de la perte interne d'exergie est associée à l'irréversibilité thermodynamique des réactions chimiques. A cet effet, Leits et Coll [30] proposent plusieurs approches de réduction de ces irréversibilités thermodynamiques, contrairement à Heynoud (cité par Leits et Coll, [30]) qui présume que ces pertes sont inévitables et incontournables.

Si on considère une réaction chimique exothermique à température constante, suivant le principe de Le Chatelier, une diminution de la température accélère la réaction et augmente la quantité de chaleur libérée. Par contre, elle conduit à la diminution de la valeur exergetique de la quantité de chaleur libérée, donnée par :

$$W = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (II.68)$$

Il est donc clair, qu'il existe pour ce cas de réaction une température optimale correspondant à une perte exergetique minimale et un travail maximal. Toutefois, la bonne configuration du réacteur doit correspondre à un profil de température (*figure II.20 a*), qui débute par une valeur maximale et diminue ensuite progressivement jusqu'à la sortie du système. De ce fait, la force motrice $(-\Delta G)$ sera réduite au début par l'effet de la haute température et à la fin par

l'appauvrissement des réactifs. A l'opposé, pour une réaction endothermique (*figure II.20 b*), la température débute par une valeur minimale et augmente ensuite graduellement le long du réacteur.

Dans le cas d'une réaction chimique avec variation de volume, on a :

$$\left[\frac{\partial(\Delta G)}{\partial P} \right] = \Delta V \quad (II.69)$$

Si la réaction s'effectue avec augmentation de volume ($\Delta V > 0$), une diminution de pression entraîne une augmentation de la valeur absolue de $(-\Delta G)$. Par conséquent, le taux d'avancement de la réaction sera important et la perte exergetique sera grande.

Dans le sens opposé, une augmentation de la pression favorise la réduction de la perte exergetique et défavorise le taux d'avancement de cette réaction.

La bonne configuration de ce compromis est d'effectuer la réaction avec un profil de pression le long du réacteur (*figure II.20 c*): au début la pression est élevée, ensuite elle s'atténue

progressivement; de cette manière le processus de réaction se déroule avec une force motrice réduite en tous points du réacteur. A l'inverse la figure (*figure II.20 d*) correspond à la configuration d'une réaction s'effectuant avec diminution de volume. La pression de la réaction est faible au départ, ensuite elle augmente graduellement.

Par ailleurs, ces auteurs montrent aussi que l'utilisation d'un excès de réactif, conduit à l'augmentation de la force motrice $(-\Delta G)$ et par conséquent à l'augmentation de la perte exergetique. Ils proposent de conduire la réaction de manière à ce qu'elle soit incomplète à la sortie et recycler ensuite la quantité du réactif qui n'a pas réagi.

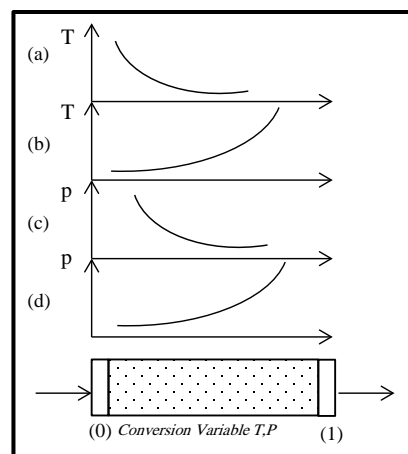


Figure II.14 : Configuration de réduction des irréversibilités thermodynamiques des réactions chimiques (Leits et coll, 2003)

CONCLUSION

L'analyse thermodynamique des dégradations d'énergie est une approche riche en conséquence dans l'étude des procédés.

L'exergie constitue un outil de travail extrêmement pratique, dès que l'on veut mettre en évidence la qualité thermodynamique d'un procédé ; ceci quelles que soient sa taille, sa complexité et la nature des phénomènes dont il est le siège. Elle permet en effet de poser un véritable diagnostic concernant la performance thermodynamique du procédé, en décelant toutes les imperfections correspondant à l'enchaînement :

Irréversibilité → dégradation d'énergie → perte

Elle permet donc de lutter contre le gaspillage des énergies primaires en incitant les praticiens à réaliser les opérations aussi réversibles que possible, en commençant par éliminer les irréversibilités les plus évidentes. Elle permet aussi d'évoluer vers une optimisation meilleure et une exploitation plus rationnelle des installations. De plus, elle contribue à améliorer la valorisation de la récupération du contenu exergetique des rejets, tels que les gaz de rejet des cheminées, des sous-produits, etc ...

L'ensemble des résultats de l'analyse exergetique des procédés de l'industrie agro-alimentaire, rapportés par la littérature, tend à identifier le procédé de cuisson comme étant le plus dégradant d'énergie. Ce procédé présente une surconsommation d'énergie à priori inutile pour le procédé en question mais due à sa mise en œuvre.

Ici apparaissent les limites de cette analyse, la détection d'une dégradation d'énergie ne donne pas la solution de sa résorption, et le classement des dégradations n'est pas celui des gains réalisables.

Ainsi, notre tâche actuelle consiste à : d'une part, de comprendre et d'identifier pour le procédé étudié les mécanismes et les causes qui président à son imperfection thermodynamique, d'autre part de minimiser les pertes envers les contraintes globales du procédé.

La recherche donc d'un minimum de production d'entropie ou de perte exergetique dans le procédé, peut se traduire par l'identification des paramètres opératoires de décision qui affectent considérablement cette dégradation d'énergie.

Par ailleurs, la répartition des dégradations d'énergie associées à la réaction chimique et au transfert thermique dans la cuve de matière et la cuve d'ébullition, ainsi que l'influence des

paramètres opératoires sur ces pertes n'ont pas été abordées par la littérature. En conséquence notre étude sera centrée à clarifier autant que possible ces différents points.

CHAPITRE III

*BILAN MASSIQUE: CHAUDIERE A VAPEUR-
CUVE MATIERE – CUVE EBULLITION*

III. 1.COMBUSTIBLE

a) Le gaz naturel

Le combustible utilisé à la brasserie de Reghaia est le gaz naturel du Sahara dont les spécificités sont données ci-après:

✓ Composition (% en volume) du GN:

Tableau III.1:Composition du gaz naturel (% en volume) [12].

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	n-C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀ ^{iso}	n-C ₅ H ₁₂	C ₅ H ₁₂ ^{iso}	C ₆ H ₁₄	CO ₂	N ₂	H ₂ O
83,50	6,90	2,10	0,33	0,53	0,12	0,14	0,11	0,21	5,85	0,19

✓ Poids spécifique : 0,829 kg/Nm³ (0°C ; 1 bar).

✓ La pression à l'entrée de la rampe de gaz est de 1 bar, la température 15°C.

b) L'air ambiant

L'air ambiant possède une humidité relative de 70 %

soit: $p_{H_2O}/p^s_{H_2O} = 0,70$, où $p^s_{H_2O}$ est la pression de vapeur saturante de l'eau à 25°C égale à: 21,88 mm Hg. (Perry 1980).

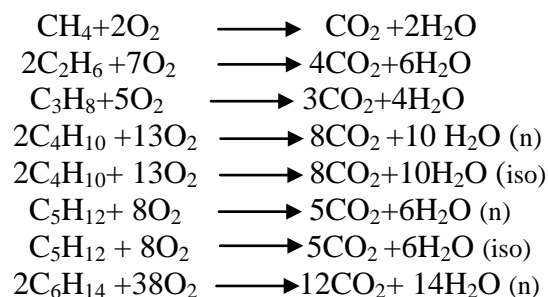
Ainsi la pression totale: $P = 0,7 \times 21,88 = 15,32$ mm Hg

d'où le taux de vapeur d'eau dans l'air = $\frac{15,32}{760} = 2\%$

L'air a donc pour composition centésimale : 2% H₂O ; 20,58 % O₂ et 77,42 % N₂

c) Calcul théorique de combustion

Les réactions chimiques mises en jeu lors de la combustion du gaz sont les suivantes :



La réaction de combustion d'un hydrocarbure avec l'air devient donc :

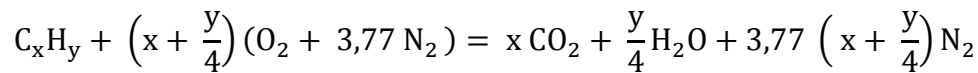


Tableau III.2: Volumes des gaz de combustion.

Composé	Volume (Nm ³)	Volume des gaz de combustion (Nm ³)			
		O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
CH ₄	0,8350	1,6700	0,8350	1,6700	
C ₂ H ₆	0,0690	0,2415	0,1380	0,2070	
C ₃ H ₈	0,021	0,1050	0,0630	0,0840	
C ₄ H ₁₀	0,0088	0,0572	0,0088	0,0440	
C ₅ H ₁₂	0,0023	0,0184	0,0023	0,0138	
C ₆ H ₁₄	0,0014	0,0133	0,0014	0,0098	
CO ₂	0,0021	_____	0,0021	_____	
N ₂	0,0585	_____	0,0585	_____	0,0585
H ₂ O	0,0019	_____	0,0019	0,0019	
Total	1,000	2,1054	1,0932	2,0305	0,0585
Air	10,230	2,1054	_____	0,2046	7,920

Tableau III.3: Volumes des fumées à la sortie de la chaudière.

Gaz de fumées de combustion, sortie chaudière	Composant (Nm ³)	CO ₂	H ₂ O	N ₂
			1,0932	2,2351
	% Volume	9,6685	19,7677	70,5637

III.2.POUVOIR COMBURIVOR

C'est le volume d'air aux conditions normales de température et de pression (0°C, 1atm), nécessaire pour brûler totalement la quantité unitaire de combustible, donc :

Partant de 20, 58% d'O₂ dans l'air, d'où 1 m³ d'O₂ correspond à 4,86 m³ d'air, à partir de ce résultat on est en mesure de connaître la quantité d'air nécessaire à la combustion de 1m³ de combustible.

Tableau III.4: Volume d'air nécessaire à la combustion.

1m ³ d'O ₂ dans 4,86 m ³ d'air	% Volume	m ³ d'air pour 1m ³ Gaz
1m ³ CH ₄ 2 m ³ d'O ₂ (9,72 m ³ d'air)	83,50	8,116
1m ³ C ₂ H ₆ 3,5 m ³ d'O ₂ (17,01m ³ d'air)	6,90	1,17
1m ³ C ₃ H ₈ 5 m ³ d'O ₂ (24,3 m ³ d'air)	2,10	0,51
1m ³ C ₅ H ₁₂ 8 m ³ d'O ₂ (38,88 m ³ d'air)	0,23	0,089
1m ³ C ₄ H ₁₀ 6,5 m ³ d'O ₂ (31,59m ³ d'air)	0,88	0,277
1m ³ C ₆ H ₁₄ 19 m ³ d'O ₂ (92,34m ³ d'air)	0,14	0,129

III. 3 AIR THEORIQUE

La quantité minimale d'air nécessaire à la combustion complète d'un combustible est appelée air strictement nécessaire ou encore air théorique.

Pour réaliser la combustion complète avec l'air théorique, il faudrait un mélange parfait. En pratique, pour assurer la combustion complète, il faut un certain excès d'air, il est caractérisé par le coefficient d'excès d'air α .

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1m³ de combustible est :

$$V_{\text{air}} = \alpha \sum_{i=1}^6 V_i$$

α : Coefficient d'excès d'air, il est théoriquement égal à 1,05 d'où:

$$V_{\text{air}} = 1,05[8,116 + 1,17 + 0,51 + 0,089 + 0,277 + 0,129] \text{ m}^3 \text{ par m}^3 \text{ de combustible}$$

$$V_{\text{air}} = 10,80 \text{ m}^3 \text{ d'air /m}^3 \text{ gaz.}$$

III. 4 POUVOIR FUMIGENE

C'est la quantité de fumée dégagée pendant la combustion totale d'une quantité unitaire de combustible.

$$V_f = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + \text{Excès d'air}$$

$$V_f = [\text{m}^3 \text{ de fumées} / \text{m}^3 \text{ de combustible}]$$

Excès d'air = 10 % [13]

a) Calcul des fumées

✓ Chaudière

Tableau III.5: Calcul des fumées de combustion.

Calcul fumées de combustion	Combustible G.N	Air de combustion			Volume des fumées			
	Débit Nm ³ /h	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂
Composition d'air O ₂ : 20,58 % N ₂ : 77,42 % H ₂ O: 2%	Q = 578 Nm³/h	1284,685	4832,866	124,848	631,8696	4611,57	1291,88	0
Calcul fumées totales	Total fumées humides: 6535,31 Nm ³ / Total fumées sèches: 5243,43 Nm ³				631,8696	4611,57	1291,88	0
Calcul fumées réelles humides	gaz sec:O ₂ = 10 % Air total en excès:624,24 Nm ³ Total fumées humides réelles:7159,55Nm ³					483,286	12,484	128,468
	Composition fumées réelles humides%				8,82	71,16	18,21	1,79

III.5. LES BILANS MASSIQUES

III.5.1. Le bilan matière de la cuve matière

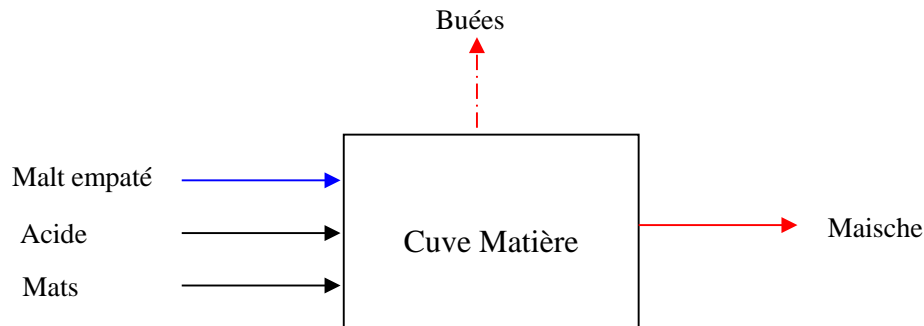


Figure III.1: Bilan massique de la cuve matière.

Après l'empâtage de la mouture avec l'eau chaude dans un hydrateur on obtient un mélange qui s'appelle " *la maïsche*", l'empesage se compose de mélanger et chauffer la maïsche dans une cuve de matière, et a lieu par décoction.

Débit du malt empâté entré à la cuve de matière:

$$\dot{m}_{(\text{malt empâté})} = 2,2 \text{ kg/s}$$

On ajoute de petites quantités de: * Mats : pour libérer les enzymes
* Acides : pour corriger le pH (5,40 – 5,50)

Débit des buées (pertes par évaporation) sortie de la cuve de matière :

$$\text{Pertés (buées)} = 3 \% [13]$$

$$\dot{m}_{(\text{pertés})} = (2,2 \times 3) / 100 = 0,07 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{(\text{pertés})} = 0,07 \text{ kg/s}$$

Bilan de matière de la cuve de matière

Le bilan de matière s'écrit alors:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_p = \sum \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_{(\text{maïsche})} = 2,2 - 0,07 = 2,13 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{(\text{maïsche})} = 2,13 \text{ kg/s}$$

La figure suivante présente la cuve matière réelle installée au niveau de l'entreprise



Figure III.2: Cuve de matière.

III.5.2. Le bilan matière de la cuve d'ébullition

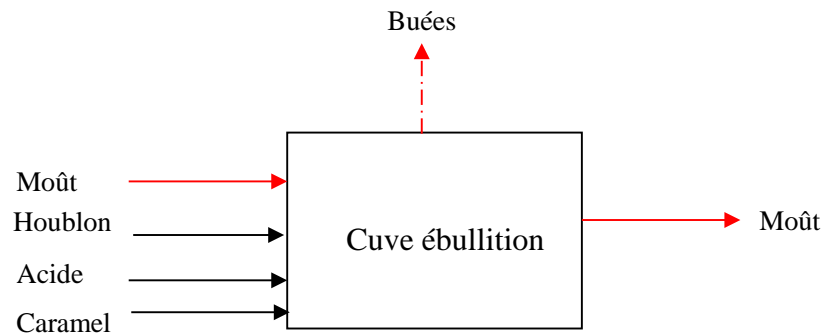


Figure III.3: Bilan massique de la cuve d'ébullition

L'extrait aqueux, appelé moût, est séparé des restes de grains d'orge et porté à ébullition avec du houblon. L'ébullition du moût permet d'une part, d'extraire les composés parfumés du houblon responsables de l'amertume de la boisson mais aussi, d'autre part, de stopper l'action des enzymes.

Débit du moût entré à la cuve d'ébullition:

$$\dot{m}_{(\text{moût})} = 1,92 \text{ kg/s,}$$

$$\dot{m}_{(\text{eau})} = 0,06 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{(\text{moût})} + \dot{m}_{(\text{eau})} = 1,98 \text{ kg/s.}$$

On ajoute de petites quantités de: * Caramel: colorant
* Acides : pour corriger le pH (5,40 – 5,50)

Débit des buées (pertes par évaporation) sortie de la cuve d'ébullition:

$$\text{Pertés (buées)} = 10 \% \quad [13]$$

$$\dot{m}_{(\text{pertés})} = (1,98 \times 10) / 100 = 0,2 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{(\text{pertés})} = 0,2 \text{ kg/s}$$

Bilan de matière de la cuve d'ébullition

Le bilan de matière s'écrit comme suit:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_p = \sum \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_{(\text{moût})} = 1,98 - 0,2 = 1,78 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{(\text{moût})} = 1,78 \text{ kg/s}$$

La figure suivante présente la cuve d'ébullition réelle installée au niveau de l'entreprise



Figure III.4: Cuve d'ébullition

III.5.3. Le bilan matière de la chaudière

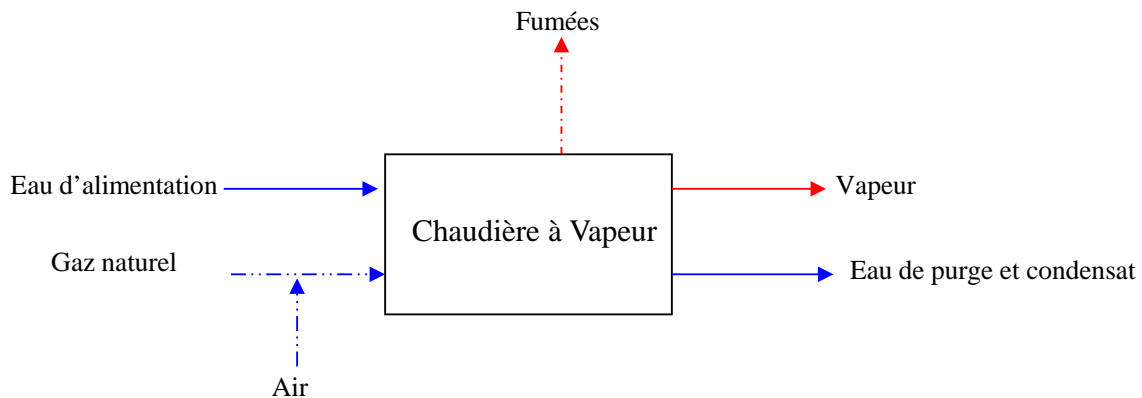


Figure III.5: Bilan massique de la chaudière.

Le système de chauffage utilisé est la chaudière à vapeur pour produire la vapeur qui sert à véhiculer l'énergie thermique nécessaire à la cuisson de la matière et du moût, en utilisant le gaz naturel.

Débit de l'eau entrée à la chaudière:

$$\dot{m}_{(\text{Eau d'alimentation})} = 2,22 \text{ kg/ s}$$

Débit des eaux de purge sortie de la chaudière:

$$\text{Pertes} = 10 \% \quad [13]$$

$$\dot{m}_{(\text{eau de purge})} = (2,22 \times 10)/100 = 0,22 \text{ kg/ s}$$

$$\dot{m}_{(\text{eau de purge})} = 0,22 \text{ kg/ s}$$

Bilan de matière de la chaudière

Le bilan de matière s'écrit :

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_p = \sum \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_{(\text{vapeur})} = 2,22 - 0,22 = 2 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{(\text{vapeur})} = 2 \text{ kg/ s}$$

La figure suivante présente la chaudière réelle installée au niveau de l'entreprise



Figure III.6: Chaudière à vapeur.

CHAPITRE IV

*BILAN ENERGETIQUE: CHAUDIERE A VAPEUR-
CUVE MATIERE – CUVE EBULLITION*

INTRODUCTION

La plupart des systèmes de chauffage utilisent des chaudières pour produire l'eau chaude ou la vapeur. Dans cette étude l'analyse exergétique est faite sur la chaudière, la cuve de matière et la cuve d'ébullition,

La chaudière est employée dans beaucoup d'applications industrielles, et utilise une quantité importante d'énergie, l'amélioration de son efficacité et la réduction des pertes ou destruction d'exergie joueront un rôle significatif en gain d'énergie en plus de la réduction de la pollution environnementale.

La chaleur peut être perdue des chaudières par des manières diverses, y compris des pertes de fumées chaudes, pertes par rayonnement et, dans le cas des chaudières à vapeur, les pertes de purges, comme le montre la figure (IV.1).

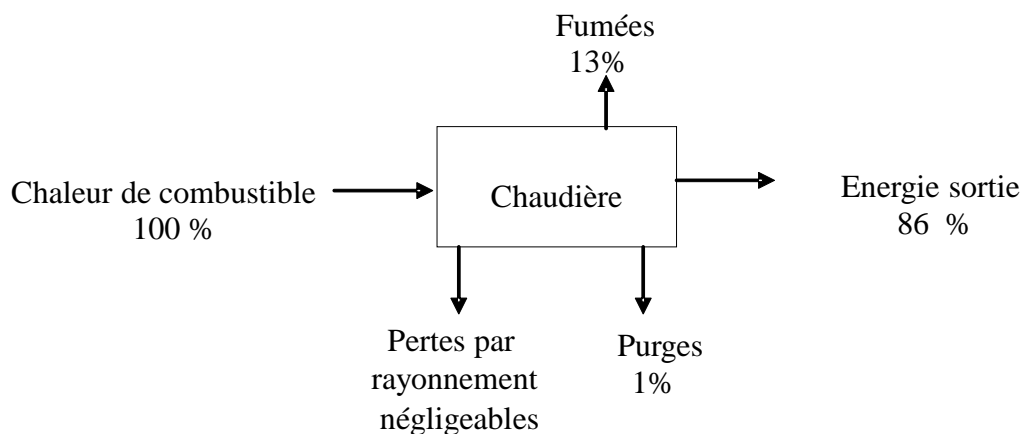


Figure IV. I : *Équilibre thermique d'une chaudière.*

Alors pour optimiser le système de chauffage, il est nécessaire d'identifier où le gaspillage d'énergie est susceptible de se produire, et pour simplifier on suppose que les pertes par rayonnement sont négligeables, les méthodes de calculs sont présentés dans l'annexe.

IV.1.RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1.1. Analyse sur la chaudière

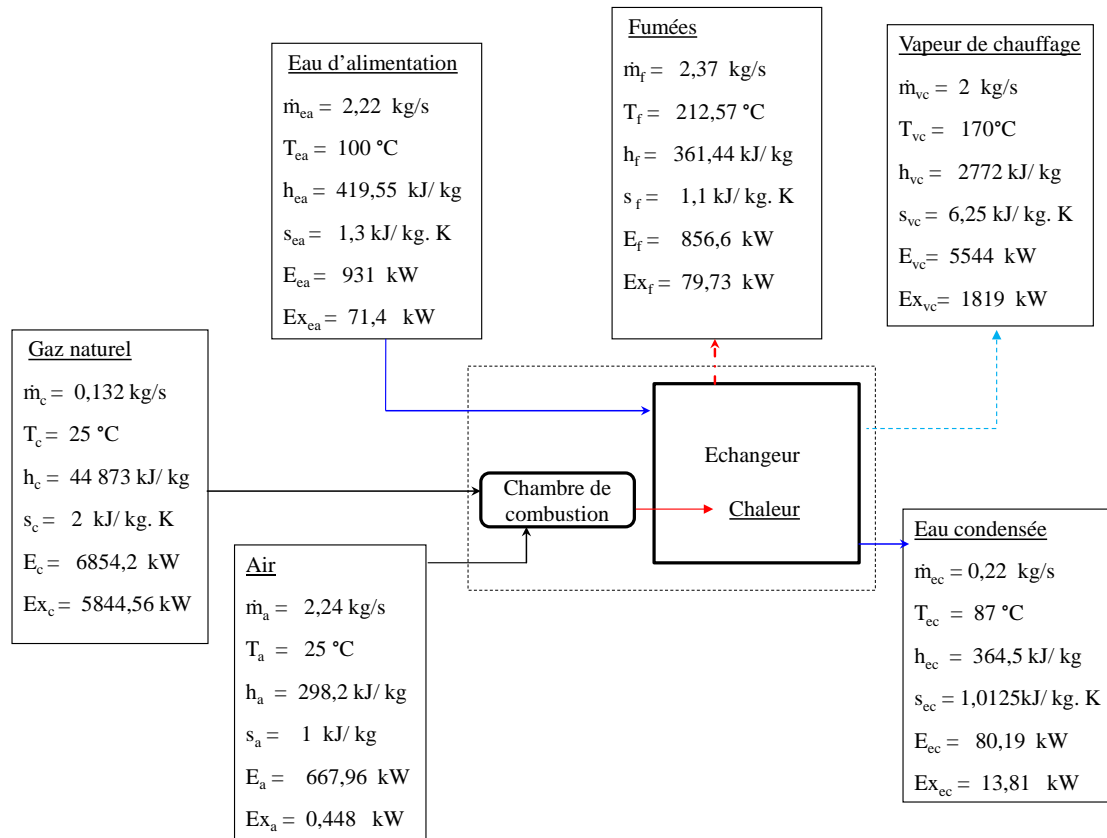


Figure IV.2: Bilan massique et énergétique de la chaudière.

Tableau IV.1: Résultats concernant l'enthalpie et l'entropie au niveau de la chaudière

Substances	Taux des flux de masse kg/s	Température °C	Enthalpie kJ/kg	Entropie kJ/kg.K
Air, \dot{m}_a	2,24	25	298,2	1
Combustible, \dot{m}_c	0,132	25	44 873	2
Produits chauds, \dot{m}_{pc}	2,37	269,22	2781,04	5,13
Eau d'alimentation, \dot{m}_{ea}	2,22	100	419,15	1,3
Vapeur, \dot{m}_{vc}	2	170	2772	6,25
Fumée, \dot{m}_f	2,37	212,485	361,44	1,1
Eau condensée, \dot{m}_{ec}	0,22	87	364,5	1,0125

IV.1.2. Utilisation d'énergie de la chambre de combustion

A partir des données du tableau *IV.1*, l'énergie entrée peut être calculée comme suit:

$$E_{CC} = \dot{m}_c h_c + \dot{m}_a h_a \quad (IV.1)$$

$$E_{CC} = 6591,2 \text{ kJ/s}$$

Puisque la chaudière a une chambre de combustion adiabatique et l'enthalpie spécifique du combustible est considéré égale à la valeur calorifique supérieure, l'efficacité est toujours de 100%. Par conséquent, l'énergie entrée dans le système de la chaudière est égale à 6591,2 kJ/s, ce qui signifie que toute l'énergie entrée est envoyée à l'échangeur de chaleur et il n'y a aucune perte de chaleur vers l'environnement.

IV.1.3. La destruction d'exergie dans la chambre de combustion

La destruction d'exergie dans la chambre de combustion est estimée en utilisant l'équation :

$$Ex_{dCC} = \dot{m}_c Ex_c + \dot{m}_a Ex_a - \dot{m}_p Ex_p \quad (IV.2)$$

On suppose que la variation de la masse et de l'énergie dans la chambre de combustion est nulle, qu'il n'y a aucune interaction impliquant du travail et les énergies cinétiques et potentielles sont négligeables. En utilisant l'équation (IV. 2) et les données du tableau *IV.1*, la destruction d'exergie est calculée comme suit :

$$Ex_{dCC} = \dot{m}_c (h_c - T_0 s_c) + \dot{m}_a (h_a - T_0 s_a) - \dot{m}_p (h_p - T_0 s_p)$$

$$Ex_{dCC} = 2877,06 \text{ kJ/s}$$

L'application de la deuxième loi appropriée pour la chambre de combustion s'exprime par l'équation :

$$\Psi_{CC} = \frac{\dot{m}_p Ex_p}{\dot{m}_c Ex_c} \quad (IV.3)$$

avec les données du tableau *IV.1*, on calcule l'efficacité de la chambre comme suit :

$$\Psi_{CC} = \frac{\dot{m}_p (h_p - T_0 s_p)}{\dot{m}_c (h_c - T_0 s_c)}$$

$$\Psi_{CC} = 51 \%$$

Ainsi, la destruction d'exergie de la chambre de combustion conduit à une efficacité de 51%, elle est donc haute et explique le fait que la chambre de combustion n'est pas entièrement adiabatique et la combustion ne peut pas être complète.

IV.1.4. Utilisation de l'énergie dans l'échangeur de chaleur

La perte de chaleur du système est calculée en utilisant l'équation (IV.4) et les données du tableau IV.1.

$$E_{EC} = \dot{E}_e - \dot{E}_s = [\dot{m}_{pc} h_{pc} + \dot{m}_{ea} h_{ea}] - [\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{ec} h_{ec}] \quad (IV.4)$$

$$E_{EC} = 1041,8 \text{ kJ/kg}$$

L'application de la première loi appropriée pour l'échangeur de chaleur est exprimée par l'équation (IV.5) :

$$\eta_{EC} = \frac{\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{ec} h_{ec}}{\dot{m}_{pc} h_{pc} + \dot{m}_{ea} h_{ea}} \quad (IV.5)$$

avec les données du tableau IV.1 on calcule l'efficacité de l'échangeur comme suit :

$$\eta_{EC} = 86,15\%$$

Par conséquent, il y a environ 13,85% d'énergie dissipée au niveau de l'échangeur de chaleur et environ 86,15% d'énergie est utilisée pour surchauffer l'eau. L'efficacité énergétique globale de la chaudière est calculée en utilisant l'équation (IV.6) :

$$\eta_C = \frac{\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{ec} h_{ec}}{\dot{m}_c h_c + \dot{m}_a h_a + \dot{m}_{ea} h_{ea}} \quad (IV.6)$$

avec les données du tableau IV.1 on calcule l'efficacité globale de la chaudière comme suit :

$$\eta_C = 86,15 \%$$

IV.1.5. La destruction d'exergie dans l'échangeur de chaleur

La destruction d'exergie dans l'échangeur de chaleur est calculée par utilisation de l'équation (IV.7) et les données du tableau IV.1.

$$Ex_{d EC} = [\dot{m}_{pc} Ex_{pc} + \dot{m}_{ea} Ex_{ea}] - [\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_f Ex_f + \dot{m}_{ec} Ex_{ec}] \quad (IV.7)$$

$$Ex_{d EC} = 1126,79 \text{ kJ/s}$$

L'application de la deuxième loi appropriée pour l'échangeur de chaleur donne l'équation (IV.8):

$$\Psi_{EC} = \frac{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_f Ex_f + \dot{m}_{ec} Ex_{ec}}{\dot{m}_{pc} Ex_{pc} + \dot{m}_{ea} Ex_{ea}} \quad (IV.8)$$

avec les données du tableau IV.1 on calcule l'efficacité de l'échangeur comme suit :

$$\Psi_{EC} = \frac{[\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_f(h_f - T_0 s_f) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec})]}{[\dot{m}_{pc}(h_{pc} - T_0 s_{pc}) + \dot{m}_{ea}(h_{ea} - T_0 s_{ea})]}$$

$$\Psi_{EC} = 62,92\%$$

Ainsi, le bilan exergetique global pour la chaudière est obtenu en ajoutant le bilan exergetique de la chambre de combustion et de l'échangeur de chaleur :

$$Ex_{dC} = Ex_{dCC} + Ex_{dEC} \quad (IV.9)$$

d'où le calcul donne :

$$Ex_{dC} = 4003,85 \text{ kJ/s}$$

L'efficacité globale exergetique de la chaudière est calculée en utilisant l'équation (IV.10)

et les données du tableau IV.1 comme suit :

$$\Psi_C = \frac{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_f Ex_f + \dot{m}_{ec} Ex_{ec}}{\dot{m}_c Ex_c + \dot{m}_a Ex_a + \dot{m}_{ea} Ex_{ea}} \quad (IV.10)$$

$$\Psi_{EC} = 34 \%$$

Les résultats obtenus ci-dessus sont récapitulés dans les tableaux IV.2 et IV.3.

Tableau IV.2: Analyse énergétique et exergetique pour la chambre de combustion l'échangeur de chaleur et la chaudière.

	Consommation énergétique (kJ/s)	Destruction exergetique (kJ/s)
Chambre de combustion	6591,2	2877,06
Echangeur de chaleur	1041,8	1126,79
Chaudière	7633	4003,85

Tableau IV.3: L'efficacité énergétique et exergetique pour la chambre de combustion, l'échangeur de chaleur et la chaudière.

	Efficacité énergétique (kJ/s)	Efficacité exergetique (kJ/s)
La chambre de combustion	100	51
Echangeur de chaleur	86,15	62,92
Chaudière	86,15	34

L'énergie globale utilisée de la chaudière: 7633 kJ/s. C'est la quantité d'énergie minimale nécessaire pour assurer le chauffage de l'eau et de produire une bonne quantité de vapeur. La destruction d'exergie dans la chaudière (4003,85 kJ/s) est élevée: la chambre de combustion y

contribue par la plus grande quantité, car la température à l'entrée de la chambre de combustion est basse et celle de cette dernière est élevée, ces différences de températures sont la cause de la destruction d'exergie dans la chambre de combustion.

De même le processus dans l'échangeur de chaleur implique différents gradients de température entre les tubes, il y a donc une tendance à générer une perte d'énergie par dissipation de chaleur.

Les efficacités énergétiques et exergetiques présentées dans le tableau *IV.3* indiquent que les efficacités globales d'énergie et d'exergie pour la chaudière sont environ 86,15% et 34%, respectivement.

L'efficacité n'est pas simplement basée sur la chaleur spécifique entrée par la vapeur, mais également basée sur la valeur calorifique inférieure du combustible pour incorporer les pertes se produisant dans la chaudière, et dûes à l'énergie perdue avec les fumées chaudes et la combustion incomplète. Cependant, on doit noter qu'une partie de cette irréversibilité ne peut pas être évitée car attachée aux contraintes physiques et technologiques.

IV.2 Analyse sur la cuve de matière

IV.2.1 Le bilan énergétique

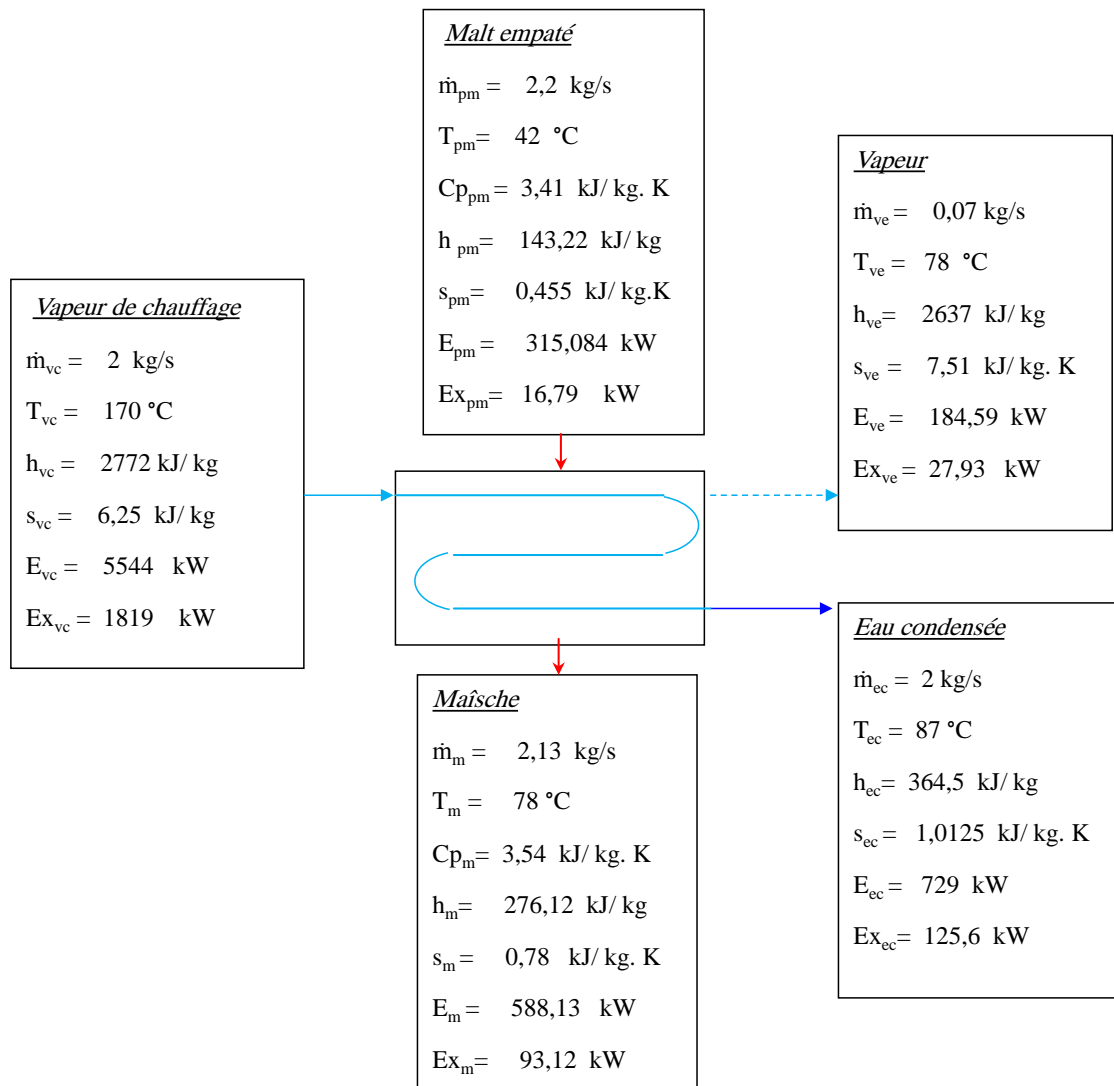


Figure IV.3: Bilan massique et énergétique de la cuve de matière.

Tableau IV.4: Résultats concernant l'enthalpie et l'entropie au niveau de la cuve de matière

Substances	Taux des flux de masse kg/s	Température °C	Enthalpie kJ/kg	Entropie kJ/kg.K
Pate de malt, \dot{m}_{pm}	2,2	42	143,22	0,445
Maische, \dot{m}_m	2,13	78	276,12	588,13
Vapeur, \dot{m}_v	0,07	78	2637	7,51
Vapeur de chauffage, \dot{m}_{vc}	2	170	2772	6,25
Eau condensée, \dot{m}_{ec}	2	87	364,5	1,0125

En utilisant l'équation IV.11 et les données du tableau IV.5, l'énergie consommée par le système est calculée comme suit :

$$E_{CM} = \dot{E}_e - \dot{E}_s = [\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{pm} h_{pm}] - [\dot{m}_m h_m + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v] \quad (IV.11)$$

$$E_{CM} = 4357,36 \text{ kJ/s}$$

L'application de la première loi appropriée pour la cuve de matière exprimée par l'équation (IV.12) :

$$\eta_{CM} = \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_e} \quad (IV.12)$$

avec les données du tableau IV.5 on calcule l'efficacité de la cuve matière comme suit :

$$\eta_{CM} = \frac{(\dot{m}_m h_m + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v)}{(\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{pm} h_{pm})}$$

$$\eta_{CM} = 25,63 \%$$

IV.2.2. Le bilan exergetique

Il est donné par l'expression :

$$\begin{aligned} Ex_{d\ CM} &= [\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{pm} Ex_{pm}] - [\dot{m}_m Ex_m + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v] \quad (IV.13) \\ &= [\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_{pm}(h_{pm} - T_0 s_{pm})] - [\dot{m}_m(h_m - T_0 s_m) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec}) \\ &\quad + \dot{m}_v(h_v - T_0 s_v)] \end{aligned}$$

d'où le calcul:

$$Ex_{d\ CM} = 1589,18 \text{ kJ/s}$$

L'application de la deuxième loi appropriée pour la cuve de matière exprimée par l'équation (IV.14) :

$$\Psi_{CM} = \frac{Ex_{d\ s}}{Ex_{d\ e}} = \frac{\dot{m}_m Ex_m + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v}{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{pm} Ex_{pm}} \quad (IV.14)$$

soit en remplaçant les termes exergetiques :

$$\Psi_{CM} = \frac{[\dot{m}_m(h_m - T_0 s_m) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec}) + \dot{m}_v(h_v - T_0 s_v)]}{[\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) - \dot{m}_{pm}(h_{pm} - T_0 s_{pm})]}$$

$$\Psi_{CM} = 13,42 \%$$

IV.3. Analyse sur la cuve d'ébullition

IV.3.1. Le bilan énergétique

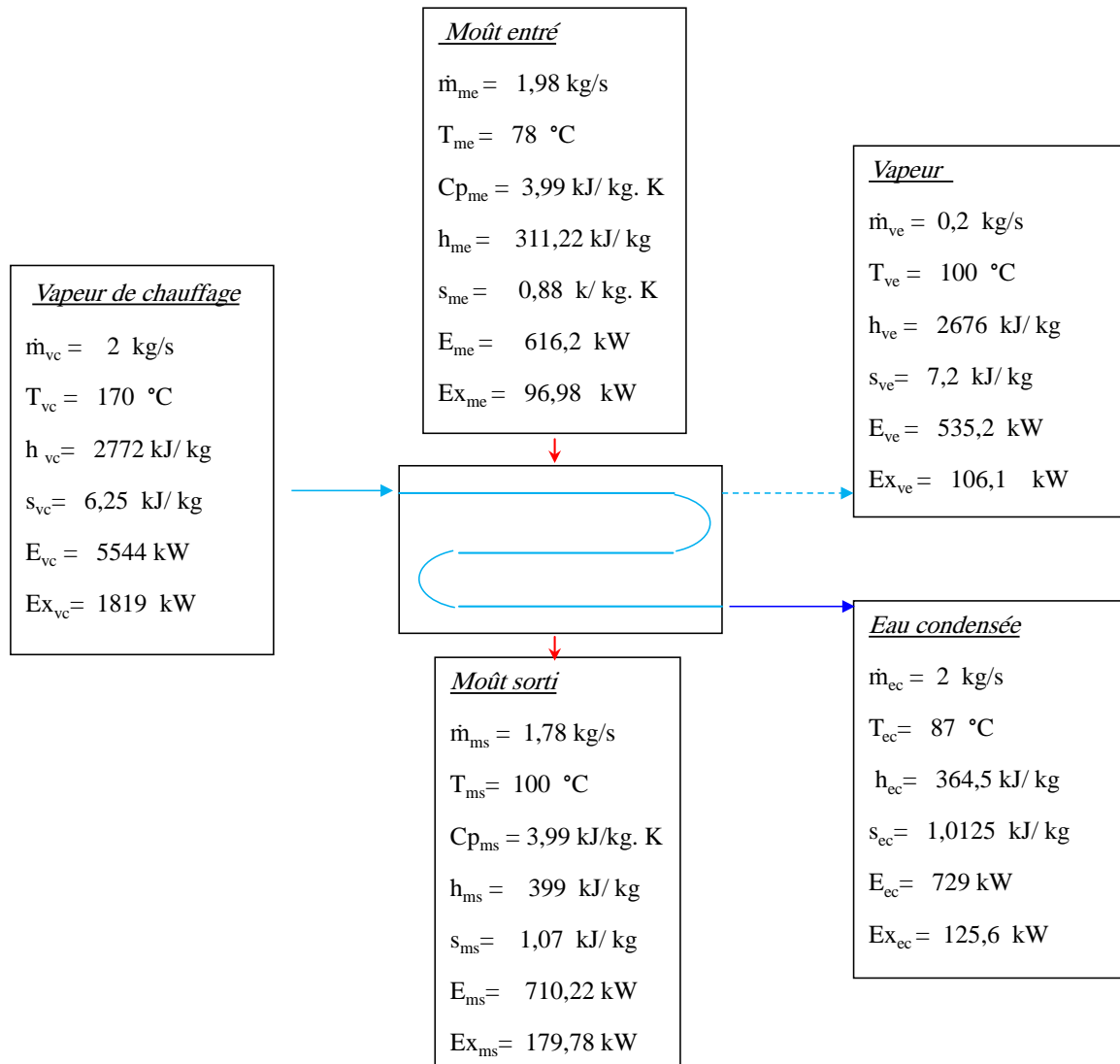


Figure IV.4: Bilan massique et énergétique de la cuve d'ébullition

Tableau IV.5: Résultats concernant l'enthalpie et l'entropie au niveau de la cuve d'ébullition

Substances	Taux des flux de masse kg/s	Température °C	Enthalpie kJ/kg	Entropie kJ/ kg .K
Moût entré, \dot{m}_{me}	1,98	78	311,22	0,88
Moût sorti, \dot{m}_{ms}	1,78	100	399	1,07
Vapeur, \dot{m}_v	0,2	100	2676	7,2
Vapeur de chauffage, \dot{m}_{vc}	2	170	2772	6,25
Eau condensée, \dot{m}_{ec}	2	87	364,5	1,0125

En utilisant l'équation IV. 15 et les données du tableau IV.6, la perte de la chaleur du système est calculée comme suit :

$$E_{CE} = \dot{E}_e - \dot{E}_s = [\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{me} h_{me}] - [\dot{m}_{ms} h_{ms} + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v] \quad (IV.15)$$

d'où le calcul:

$$E_{CE} = 4185,79 \text{ kg/s}$$

L'application de la première loi appropriée pour la cuve d'ébullition exprimée par l'équation(IV.16) :

$$\eta_{CE} = \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_e} = \frac{(\dot{m}_{ms} h_{ms} + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v)}{(\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{me} h_{me})} \quad (IV.16)$$

avec les données du tableau IV.6 on calcule l'efficacité de la cuve comme suit :

$$\eta_{CE} = 32,05 \%$$

IV.3.2. Le bilan exergetique

Il s'écrit ainsi :

$$Ex_{d CE} = [\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{me} Ex_{me}] - [\dot{m}_{ms} Ex_{ms} + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v] \quad (IV.17)$$

soit en remplaçant les termes exergetiques:

$$Ex_{d CE} = [\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_{me}(h_{me} - T_0 s_{me}) \\ - [\dot{m}_{ms}(h_{ms} - T_0 s_{ms}) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec}) + \dot{m}_v(h_v - T_0 s_v)]]$$

$$Ex_{d CE} = 1541,71 \text{ kJ/s}$$

L'application de la deuxième loi appropriée pour la cuve d'ébullition exprimée par l'équation (IV.18) :

$$\Psi_{CE} = \frac{Ex_{d s}}{Ex_{d e}} = \frac{\dot{m}_{ms} Ex_{ms} + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v}{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{me} Ex_{me}} \quad (IV.18)$$

soit en remplaçant les termes exergetiques :

$$\Psi_{CE} = \frac{\dot{m}_{ms}(h_{ms} - T_0 s_{ms}) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec}) + \dot{m}_v(h_v - T_0 s_v)}{\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_{me}(h_{me} - T_0 s_{me})}$$

$$\Psi_{CE} = 19,53 \%$$

L'application des efficacités de la première et la deuxième loi des deux cuves sont faibles parce que la chaleur véhiculée par la vapeur est utilisée pour :

- la cuisson de la matière dans la cuve matière, où on procède à des paliers de température avec des stationnements pendant des intervalles de temps pour assurer les transformations biochimiques.
- la cuisson du moût, où on procède à son ébullition pendant une heure afin de le concentrer et stopper les enzymes activités.

Conclusion générale

L'approche d'évaluation des efficacités des systèmes fournit l'information sur la dissipation d'énergie et les irréversibilités pour chaque système, elle permet de quantifier l'énergie et l'exergie des systèmes les plus dégradants afin d'améliorer l'efficacité globale de l'entreprise.

Dans cette étude, le concept utile de l'utilisation de l'énergie et de l'exergie est analysé et appliqué au système de chauffage (chaudière) et au système de cuisson (cuve de matière, cuve d'ébullition).

La performance de chaque partie de la chaîne de production est évaluée en utilisant des efficacités basées sur les deux premières lois de la thermodynamique. On a pu ainsi établir les efficacités pour les trois organes principaux de la chaîne :

- ✓ Pour la chaudière, les efficacités énergétiques et exergetiques s'avèrent 86 % et 34 %, respectivement.
- ✓ Pour la cuve de matière, les efficacités énergétiques et exergetiques s'avèrent 25,63 % et 13,42 %, respectivement.
- ✓ Pour la cuve d'ébullition, les efficacités énergétiques et exergetiques s'avèrent 32,05 % et 19,53 %, respectivement.

Pour la chaudière la chaleur peut être perdue de diverses manières, notamment des pertes de purges et par les fumées chaudes produites par le combustible brûlé et qui ne peuvent pas être transférées à l'eau ou à la vapeur.

Pour optimiser la chaudière il est nécessaire d'identifier où le gaspillage d'énergie est susceptible de se produire. Il est donc important de maximiser le transfert thermique à l'eau et de réduire les pertes de chaleur dans la chaudière.

On a constaté que la chambre de combustion est l'acteur principal pour la destruction d'exergie suivi par l'échangeur de chaleur.

On ne peut pas optimiser les deux cuves de matière et d'ébullition car les énergies consommées sont irréversibles, en raison de l'utilisation de ces dernières dans le processus de cuisson de la matière ou bien du moût.

Par contre, plusieurs mesures d'économie doivent être appliquées pour réduire les pertes d'énergie dans la chaudière telles que :

- ✓ la récupération de la chaleur des fumées pour le chauffage de l'air de combustion ou bien le chauffage de l'eau de processus à l'aide des échangeurs de chaleur,

- ✓ La réutilisation des eaux chaudes condensées pour l'alimentation de la chaudière ou bien pour le nettoyage des matériels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Hasanuzzaman^{1, 2}, R. Saidur^{1,2} and N. A. Rahim², Energy, exergy and economic analysis of an annealing Furnace, International Journal of the Physical Sciences, vol. 6(6), 2011, pp. 1257-1266.
- [2] R. Saidur n, J.U.Ahamed, H.H.Masjuki, Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers, Energy Policy, vol38, 2010, pp2188–2197.
- [3] D.A. Fadare^a, D.O. Nkpubre^a, A.O. Oni^a, A. Falana^a, M.A. Waheed^b, O.A. Bamiro^a
- [4] Energy and exergy analyses of malt drink production in Nigeria, energy, vol 35, 2010, pp 5336-5346
- [5] Z. Sogut^a, N. Ilten^b, Z. Oktay^b, Energetic and exergetic performance evaluation of the quadruple-effect evaporator unit in tomato paste production, energy, vol 35, 2010, pp 3821-3826
- [6] Abass A. Olajire, The brewing industry and environmental challenges, Journal of Cleaner production, 2012, pp 1-20
- [7] M.A. Waheed^a, S.O. Jekayinfa^b, J.O. Ojediran^b, O.E. Imeokparia^a, Energetic analysis of fruit juice processing operations in Nigeria, Energy, vol 33, 2008, pp 35-45
- [8] MoLL M, Bière & Coolers: Technique & documentation, Paris, Lavoisier 1991, 515 p
- [9] N .GANZIAMI Clovis, Mémoire de fin d'étude production et utilisation de la vapeur à l'usine de BARAKINA : Bilan énergétique et propositions d'implantation d'une nouvelle chaudière, 2000.
- [10] R. BRISSART, Technologie de la brasserie, 2003
- [11] TOUIL Djamel Analyse exergetique dans l'unité de ciment de Sour El Ghozlane 1993Mimoire da Magister
- [12] TOUIL Djamel Modélisation des dégradations d'énergie dans l'industrie du ciment Approche industrielle et de laboratoire. Thèse doctorat.
- [13] Technique de fabrication de la bière. Document de l'entreprise
- [14] J. RILLING et D. BALESSENT Recherche des possibilités d'économie d'énergie par analyse entropique, appliquée à une unité de désasphaltage au propane du résidu de distillation sous vide des pétroles bruts
- [15] La filière bière -BESS Qzralimapa 97/98
- [16] Kotas T. J., the Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Butterworths, London, (1985).
- [17] Feidt M., The dynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés, Technique et documentation; Paris (1 996).

- [18] Le Goff P., *Energétique Industrielle, Tome 1, Technique et Documentation Paris* (1980 a).
- [19] Le Goff P., *Quelle température de référence · choisir dans le calcul de l'exergie? Entropie*, 229 (2000)59 - 62.
- [20] Kameyama H., Yoshida K., Yamauchi S., Fueki K., *Evaluation of exergies for the elements, Applied energy*, 11 (1982) 68-83
- [21] Brodyanski V., Sorin M., Le Goff P., *The efficiency of industrial processes, exergy analysis and optimization, Amsterdam, Elsevier, (1994).*
- [22] Borel L., *Théorie générale de l'exergie et applications pratiques, Entropie*, 85 (1979) 3-14
- [23] Bejan A., *The concept of irreversibility in heat exchanger design: counter flow heat exchangers for gas-gas applications, ASME J. Heat Transfer*, 99 (1977) 374 -380.
- [24] Bejan A., *Entropy generation minimization: the new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes, J. Appl. Phys*, 79, 3 (1996) 1191- 1218
- [25] Bejan A., *Entropy generation through Heat and Fluid flow, John Wiley, New York, (1982).*
- [26] Tondeur D et Kvaalen E., *Equipartition of entropy production: an optimality criterion for transfer and separation processes. Ind. Eng. Chem. Res*, 26 (1987) 50 - 56.
- [27] Szargut J., Morris D R., Steward F R., *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes, Hemisphere, New york, (1988).*
- [28] Sekulic D P., *The second law quality of energy transformation in a heat exchanger, J.Heat. Transfer*, 112 (1990) 295-300
- [29] Dunbar WR et Lior N., *Sources of combustion irreversibility, Comb. Sei. Technol*, 103 (1994) 41- 61
- [30] Leites I L., Sama D A., Lior N., *The theory and practice of energy saving in the chemical industry: some methods for reducing thermodynamic irreversibility in chemical technology processes, Energy- The international journal*, 28 (2003) 55- 97
- [31] NBS/NRC Steam tables Lester Haar, John S.Gallagher, George S. Kell

ANNEXE

A1.1 Calcul des propriétés thermodynamiques

- **Choix des produits étudiés**

Les différents flux de matière étudiés déterminent les produits mis en jeu. Ils se divisent en trois catégories :

- ✓ Gaz : gaz naturel, vapeur d'eau, air, fumées.
- ✓ Solides : drèche, malt empaté, maische, poussière.
- ✓ Liquide : eau d'alimentation, eau condensée, moût.

- **Etats de référence**

Température de référence $T_0 = 25 \text{ °C}$

Pression de référence $P_0 = 1 \text{ bar}$

1. Pour la chaudière

Pression de marche de la chaudière : 7 à 10 bar

Puissance de la chaudière : 5973 kw

- Gaz naturel

$$\dot{m}_c = 0,132 \text{ kg/s}$$

$$PC_I = 37\,200 \text{ kJ/m}^3 \text{ [13]}$$

$$\Delta h_c = \int_{T_0}^T C_p dT = 44\,873 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta S_c = \int_{T_0}^T C_p d \ln T = 2 \text{ kJ/kg. K}$$

$$E_c = \dot{m}_c \times h_c = 5923,23 \text{ kJ/s}$$

$$E_{x_c} = \dot{m}_c (h_c - T_0 s_c) = 5844,56 \text{ kJ/s}$$

- Air

$$\dot{m}_a = 2,24 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 25 \text{ °C}$$

$$C_p = 1 \text{ kJ/kg. K}$$

$$\Delta h_a = \int_{T_0}^T C_p dT = 298,2 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta S_a = \int_{T_0}^T C_p d \ln T = 1 \text{ kJ/kg}$$

$$E_a = \dot{m}_a \times h_a = 667,96 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_a = \dot{m}_a (h_a - T_0 s_a) = 0,448 \text{ kJ/s}$$

- Fumées

$$\dot{m}_f = 2,37 \text{ kg/s}$$

$$T_f = 212,57 \text{ °C [13]}$$

$$\Delta h_f = \int_{T_0}^T Cp dT = 361,44 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta S_f = \int_{T_0}^T Cp d \ln T = 1,1 \text{ kJ/kg.K}$$

$$E_f = \dot{m}_f \times h_f = 856,6 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_f = \dot{m}_f (h_f - T_0 s_f) = 79,73 \text{ kJ/s}$$

- Eau d'alimentation

$$\dot{m}_{ea} = 2,22 \text{ kg/s}$$

$$T_{ea} = 100 \text{ °C}$$

$$h_a = 419,55 \text{ kJ/kg [31]}$$

$$s_a = 1,3 \text{ kJ/kg.K [31]}$$

$$E_{ea} = \dot{m}_{ea} \times h_{ea} = 931 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{ea} = \dot{m}_{ea} (h_{ea} - T_0 s_{ea}) = 71,4 \text{ kJ/s}$$

- Vapeur

$$\dot{m}_{vc} = 2 \text{ kg/s}$$

$$T_{vc} = 170 \text{ °C}$$

$$h_{vc} = 2772 \text{ kJ/kg [31]}$$

$$s_{vc} = 6,25 \text{ kJ/kg.K [31]}$$

$$E_{vc} = \dot{m}_{vc} \times h_{vc} = 5544 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{vc} = \dot{m}_{vc} (h_{vc} - T_0 s_{vc}) = 1819 \text{ kJ/s}$$

- Eau condensée

$$\dot{m}_{ec} = 0,22 \text{ kg/s}$$

$$T_{ec} = 87 \text{ °C}$$

$$h_{ec} = 364,5 \text{ kJ/kg [5]}$$

$$S_{ec} = 1,0125 \text{ kJ/ kg. K} \quad [5]$$

$$E_{ec} = \dot{m}_{ec} \times h_{ec} = 80,19 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{ec} = \dot{m}_{ec} (h_{ec} - T_0 S_{ec}) = 13,81 \text{ kJ/s}$$

- Produits chauds

$$\dot{m}_{pc} = 2,37 \text{ kg/s}$$

$$T_{pc} = 269,22 \text{ °C} \quad [13]$$

$$\Delta h_{pc} = \int_{T_0}^T Cp dT = 2781,04 \text{ kJ/ kg}$$

$$\Delta S_{pc} = \int_{T_0}^T Cp d \ln T = 5,13 \text{ kJ/ kg. K}$$

2. Pour la cuve de matière:

- Vapeur de chauffage

$$\dot{m}_{vc} = 2 \text{ kg/s}$$

$$T_{vc} = 170 \text{ °C}$$

$$h_{vc} = 2772 \text{ kJ/ kg} \quad [31]$$

$$S_{vc} = 6,25 \text{ kJ/ kg. K} \quad [31]$$

$$E_{vc} = \dot{m}_{vc} \times h_{vc} = 5544 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{vc} = \dot{m}_{vc} (h_{vc} - T_0 S_{vc}) = 1819 \text{ kJ/s}$$

- Malt empaté

$$\dot{m}_{pm} = 2,2 \text{ kg/s}$$

$$T_{pm} = 42 \text{ °C}$$

$$Cp_{pm} = 3,41 \text{ kJ/ kg. K} \quad [13]$$

$$\Delta h_{pm} = \int_{T_0}^T Cp dT = 143,22 \text{ kJ/ kg}$$

$$\Delta S_{pm} = \int_{T_0}^T Cp d \ln T = 0,455 \text{ kJ/ kg.K}$$

$$E_{pm} = \dot{m}_{pm} \times h_{pm} = 315,084 \text{ kW}$$

$$Ex_{pm} = \dot{m}_{pm} (h_{pm} - T_0 S_{pm}) = 16,79 \text{ kW}$$

- Maîsche

$$\dot{m}_m = 2,13 \text{ kg/s}$$

$$T_m = 78 \text{ °C}$$

$$x_{CM} = 0,70 \text{ est la fraction de l'eau dans la maîche} \quad [3]$$

$$C_{p_m} = 4,1868 (0,3823 + 0,6183 x) = 3,54 \text{ kJ/ kg. K} \quad [7]$$

$$\Delta h_m = \int_{T_0}^T C_p dT = 276,12 \text{ kJ/ kg}$$

$$\Delta S_m = \int_{T_0}^T C_p d \ln T = 0,78 \text{ kJ/ kg. K}$$

$$E_m = \dot{m}_m \times h_m = 588,13 \text{ kW}$$

$$Ex_m = \dot{m}_m (h_m - T_0 s_m) = 93,12 \text{ kW}$$

- Vapeur évaporée

$$\dot{m}_{ve} = 0,07 \text{ kg/s}$$

$$T_{ve} = 78 \text{ °C}$$

$$h_{ve} = 2637 \text{ kJ/ kg} \quad [31]$$

$$S_{ve} = 7,51 \text{ kJ/ kg. K} \quad [31]$$

$$E_{ve} = \dot{m}_{ve} \times h_{ve} = 184,59 \text{ kW}$$

$$Ex_{ve} = \dot{m}_{ve} (h_{ve} - T_0 s_{ve}) = 27,93 \text{ kW}$$

- Eau condensée

$$\dot{m}_{ec} = 0,22 \text{ kg/s}$$

$$T_{ec} = 87 \text{ °C}$$

$$h_{ec} = 364,5 \text{ kJ/ kg} \quad [5]$$

$$S_{ec} = 1,0125 \text{ kJ/ kg. K} \quad [5]$$

$$E_{ec} = \dot{m}_{ec} \times h_{ec} = 80,19 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{ec} = \dot{m}_{ec} (h_{ec} - T_0 s_{ec}) = 13,81 \text{ kJ/s}$$

3. Pour la cuve d'ébullition

- Vapeur de chauffage

$$\dot{m}_{vc} = 2 \text{ kg/s}$$

$$T_{vc} = 170 \text{ °C}$$

$$h_{vc} = 2772 \text{ kJ/ kg} \quad [31]$$

$$s_{vc} = 6,25 \text{ kJ/ kg. K} \quad [31]$$

$$E_{vc} = \dot{m}_{vc} \times h_{vc} = 5544 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{vc} = \dot{m}_{vc} (h_{vc} - T_0 s_{vc}) = 1819 \text{ kJ/s}$$

- Mouît entré
-
-

$$\dot{m}_{me} = 1,98 \text{ kg/s}$$

$$T_{me} = 78 \text{ °C}$$

$$x_{CE} = 0,85 \text{ est la fraction de l'eau dans le moût} \quad [3]$$

$$Cp_{me} = 4,1868(0,3823 + 0,6183 x) = 3,99 \text{ kJ/ kg. K} \quad [7]$$

$$\Delta h_{me} = \int_{T_0}^T Cp dT = 311,22 \text{ kJ/ kg} \quad \text{kJ/ kg}$$

$$\Delta S_{me} = \int_{T_0}^T Cp d \ln T = 0,88 \text{ k/ kg. K}$$

$$E_{me} = \dot{m}_{me} \times h_{me} = 616,2 \text{ kW}$$

$$Ex_{me} = \dot{m}_{me} (h_{me} - T_0 s_{me}) = 96,98 \text{ kW}$$

- Moût sorti

$$\dot{m}_{ms} = 1,78 \text{ kg/s}$$

$$T_{ms} = 100 \text{ °C}$$

$$x_{CE} = 0,85 \text{ est la fraction de l'eau dans le moût} \quad [3]$$

$$Cp_{ms} = 4,1868(0,3823 + 0,6183 x) = 3,99 \text{ kJ/kg. K} \quad [7]$$

$$\Delta h_{ms} = \int_{T_0}^T Cp dT = 399 \text{ kJ/ kg}$$

$$\Delta S_{ms} = \int_{T_0}^T Cp d \ln T = 1,07 \text{ kJ/ kg}$$

$$E_{ms} = \dot{m}_{ms} \times h_{ms} = 710,22 \text{ kW}$$

$$Ex_{ms} = \dot{m}_{ms} (h_{ms} - T_0 s_{ms}) = 179,78 \text{ kW}$$

- Vapeur évaporée

$$\dot{m}_{ve} = 0,2 \text{ kg/s}$$

$$T_{ve} = 100 \text{ °C}$$

$$h_{ve} = 2676 \text{ kJ/ kg} \quad [31]$$

$$S_{ve} = 7,2 \text{ kJ/ kg} \quad [31]$$

$$E_{ve} = \dot{m}_{ve} \times h_{ve} = 535,2 \text{ kW}$$

$$Ex_{ve} = \dot{m}_{ve} (h_{ve} - T_0 s_{ve}) = 106,1 \text{ kW}$$

- Eau condensée

$$\dot{m}_{ec} = 0,22 \text{ kg/s}$$

$$T_{ec} = 87 \text{ °C}$$

$$h_{ec} = 364,5 \text{ kJ/ kg} \quad [5]$$

$$S_{ec} = 1,0125 \text{ kJ/ kg. K} \quad [5]$$

$$E_{ec} = \dot{m}_{ec} \times h_{ec} = 80,19 \text{ kJ/s}$$

$$E_{x_{ec}} = \dot{m}_{ec} (h_{ec} - T_{0s_{ec}}) = 13,81 \text{ kJ/s}$$

A1.2 Bilan énergétique

1. Pour la chaudière

- Calcul de l'énergie entrée dans la chambre de combustion:

$$\begin{aligned} E_{CC} &= \dot{m}_c h_c + \dot{m}_a h_a \\ &= 0,132 \times 44\,873 + 2,47 \times 298,2 = 5923,23 + 667,96 \\ E_{CC} &= 6591,2 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

- Calcul de l'énergie utilisée par l'échangeur de chaleur:

$$\begin{aligned} E_{EC} &= \dot{E}_e - \dot{E}_s = [\dot{m}_{pc} h_{pc} + \dot{m}_{ea} h_{ea}] - [\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{ec} h_{ec}] \\ &= [(2,37 \times 2781,04) + (2,22 \times 419,55)] - [(2 \times 2772) + (2,37 \times 361,44) + 0,22 \times 364,5] \\ &= [6591,2 + 931,40] - [5544 + 856,61 + 80,19] = 7522,6 - 6480,8 = 1041,8 \\ E_{EC} &= 1041,8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

2. Pour la cuve de matière

- Calcul de l'énergie consommée par le système:

$$\begin{aligned} E_{CM} &= \dot{E}_e - \dot{E}_s = [\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{pm} h_{pm}] - [\dot{m}_m h_m + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v] \\ &= [2 \times 2772 + 2,2 \times 143,22] - [2,13 \times 276,12 + 2 \times 364,5 + 0,07 \times 2637] \\ &= (5544 + 315,08) - (588,13 + 184,59 + 729) = 5859,08 - 1501,72 \\ E_{CM} &= 4357,36 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

3. Pour la cuve d'ébullition

- Calcul de la perte de la chaleur du système:

$$\begin{aligned} E_{CE} &= \dot{E}_e - \dot{E}_s = [\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{me} h_{me}] - [\dot{m}_{ms} h_{ms} + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v] \\ E_{CE} &= [2 \times 2772 + 1,98 \times 311,22] - [1,78 \times 399 + 2 \times 364,5 + 0,2 \times 2676] \\ &= (5544 + 616,21) - (710,22 + 729 + 535,2) = 6160,21 - 1974,42 \\ E_{CE} &= 4185,79 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

A1.3 Efficacité énergétique

- Calcul de l'efficacité énergétique de l'échangeur de chaleur:

$$\eta_{EC} = \frac{\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{ec} h_{ec}}{\dot{m}_{pc} h_{pc} + \dot{m}_{ea} h_{ea}} = \frac{6480,8}{7522,6} = 0,8615 = 86,15 \%$$

$$\eta_{EC} = 86,15\%$$

-Calcul de l'efficacité énergétique globale de la chaudière:

$$\eta_C = \frac{\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{ec} h_{ec}}{\dot{m}_c h_c + \dot{m}_a h_a + \dot{m}_{ea} h_{ea}} = \frac{(2,22 \times 2772) + (0,22 \times 364,5) + 2,37 \times 361,44}{(0,132 \times 44\,873) + (2,24 \times 298,2) + (2,22 \times 419,55)} = \frac{6480,80}{7522,6} = 0,8615$$

$$\eta_C = 86,15 \%$$

-Calcul de l'efficacité énergétique de la cuve de matière:

$$\eta_{CM} = \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_e} = \frac{(\dot{m}_m h_m + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v)}{(\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{pm} h_{pm})} = \frac{1501,72}{5859,08} = 0,2563 = 25,63 \%$$

$$\eta_{CM} = 25,63 \%$$

-Calcul de l'efficacité énergétique de la cuve d'ébullition:

$$\eta_{CE} = \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_e} = \frac{(\dot{m}_{ms} h_{ms} + \dot{m}_{ec} h_{ec} + \dot{m}_v h_v)}{(\dot{m}_{vc} h_{vc} + \dot{m}_{me} h_{me})} = \frac{1974,42}{6160,21} = 0,3205 = 32,05 \%$$

$$\eta_{CE} = 32,05 \%$$

A1.4 Bilan exergetique

1. Pour la chaudière

- Calcul de l'exergie détruite dans la chambre de combustion:

$$Ex_{dCC} = \dot{m}_c Ex_c + \dot{m}_a Ex_a - \dot{m}_p Ex_p$$

$$\begin{aligned} Ex_{dCC} &= \dot{m}_c (h_c - T_0 s_c) + \dot{m}_a (h_a - T_0 s_a) - \dot{m}_p (h_p - T_0 s_p) \\ &= 0,132 [44\,873 - 298(2)] + 2,24 [298,2 - 298(1)] - 2,37 [2781,04 - 298(5,13)] \\ &= 0,132 [44\,873 - 596] + 2,24 [298,2 - 298] - 2,37 [2781,04 - 1528,74] \\ &= 0,132 \times 44\,277 + 2,24 \times 0,2 - 2,37 \times 1252,3 \\ &= 5844,56 + 0,448 - 2967,95 \end{aligned}$$

$$Ex_{dCC} = 2877,06 \text{ kJ/s}$$

- Calcul de l'exergie détruite dans l'échangeur de chaleur :

$$\begin{aligned} Ex_{dEC} &= [\dot{m}_{pc} Ex_{pc} + \dot{m}_{ea} Ex_{ea}] - [\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_f Ex_f + \dot{m}_{ec} Ex_{ec}] \\ &= [\dot{m}_{pc} (h_{pc} - T_0 s_{pc}) + \dot{m}_{ea} (h_{ea} - T_0 s_{ea})] - [\dot{m}_{vc} (h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_f (h_f - T_0 s_f) + \dot{m}_{ec} (h_{ec} - T_0 s_{ec})] \\ &= [2,37(2781,04 - 298(5,13)) + 2,22(419,55 - 298(1,3))] \\ &\quad - [2(2772 - 298(6,25)) + 2,37(361,44 - 298(1,1)) + 0,22(364,5 - 298(1,0125))] \\ &= [2967,95 + 71,37] - [1819 + 79,72 + 27,93 + 13,81] \\ &= 3039,32 - 1912,53 = 1519,5 \end{aligned}$$

$$Ex_{dEC} = 1126,79 \text{ kJ/s}$$

- Calcul du bilan exergetique global pour la chaudière:

$$Ex_{d\ c} = Ex_{d\ CC} + Ex_{d\ EC}$$

$$Ex_{d\ c} = 2877,06 + 1126,79 = 4003,85 \text{ kJ/s}$$

$$Ex_{d\ c} = 4003,85 \text{ kJ/s}$$

2. Pour la cuve de matière

$$Ex_{d\ CM} = [\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{pm} Ex_{pm}] - [\dot{m}_m Ex_m + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v]$$

$$= [\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_{pm}(h_{pm} - T_0 s_{pm})] - [\dot{m}_m(h_m - T_0 s_m) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec})] + \dot{m}_v(h_v - T_0 s_v)]$$

$$\begin{aligned} Ex_{d\ CM} &= [2(2772 - 298(6,25)) + 2,2(143,22 - 298(0,455))] \\ &\quad - [2,13(276,12 - 298(0,78)) + 2(364,5 - 298(1,0125)) + 0,07(2637 - 298(7,51))] \\ &= [2(2772 - 2(1862,5)) - (364,5 - 301,7)] + [2,2(143,22 - 134,1) - 2,13(276,12 - 232,4)] \\ &= [1819 + 16,7] - [93,038 + 125,55 + 27,93] = 1835,7 - 246,5 = 1589,18 \end{aligned}$$

$$Ex_{d\ CM} = 1589,18 \text{ kJ/s}$$

3. Pour la cuve d'ébullition

$$Ex_{d\ CE} = [\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{me} Ex_{me}] - [\dot{m}_{ms} Ex_{ms} + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v] \text{ (IV.17)}$$

$$Ex_{d\ CE} = [\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_{me}(h_{me} - T_0 s_{me})$$

$$- [\dot{m}_{ms}(h_{ms} - T_0 s_{ms}) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec}) + \dot{m}_v(h_v - T_0 s_v)]]$$

$$\begin{aligned} &= [2(2772 - 298(6,25)) + 1,98(311,22 - 298(0,88))] \\ &\quad - [1,78(399 - 298(1,07)) + 2(364,5 - 298(1,0125)) + 0,2(2676 - 298(7,2))] \\ &= [1819 + 96,98] - [142,64 + 125,55 + 106,08] = 1915,98 - 374,27 = 1541,71 \end{aligned}$$

$$Ex_{d\ CE} = 1541,71 \text{ kJ/s}$$

A1.5 Efficacité exergetique

- Calcul de l'efficacité exergetique de la chambre de combustion:

$$\Psi_{CC} = \frac{\dot{m}_p Ex_p}{\dot{m}_c Ex_c}$$

$$\Psi_{CC} = \frac{\dot{m}_p(h_p - T_0 s_p)}{\dot{m}_c(h_c - T_0 s_c)} = \frac{2,37 [2781,04 - 298(5,13)]}{0,132 [44\ 873 - 298(2)]} = \frac{2,37 [2781,04 - 1528,74]}{0,132 [44\ 873 - 596]} = \frac{2967,95}{5844,564}$$

$$\Psi_{CC} = 0,51 = 51 \%$$

- Calcul de l'efficacité exergetique de l'échangeur de chaleur:

$$\Psi_{EC} = \frac{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_f Ex_f + \dot{m}_{ec} Ex_{ec}}{\dot{m}_{pc} Ex_{pc} + \dot{m}_{ea} Ex_{ea}}$$

$$\Psi_{EC} = \frac{[\dot{m}_{vc}(h_{vc} - T_0 s_{vc}) + \dot{m}_f(h_f - T_0 s_f) + \dot{m}_{ec}(h_{ec} - T_0 s_{ec})]}{[\dot{m}_{pc}(h_{pc} - T_0 s_{pc}) + \dot{m}_{ea}(h_{ea} - T_0 s_{ea})]} = \frac{1912,53}{3039,32} = 0,6292 = 62,92 \%$$

$$\Psi_{EC} = 62,92\%$$

- Calcul de l'efficacité globale exergetique de la chaudière:

$$\Psi_C = \frac{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_f Ex_f + \dot{m}_{ec} Ex_{ec}}{\dot{m}_c Ex_c + \dot{m}_a Ex_a + \dot{m}_{ea} Ex_{ea}} = \frac{[\dot{m}_{vc}(h_{vc}-T_0s_{vc}) + \dot{m}_f(h_f-T_0s_f) + \dot{m}_{ec}(h_{ec}-T_0s_{ec})]}{[\dot{m}_c(h_c-T_0s_c) + \dot{m}_a(h_a-T_0s_a) + \dot{m}_{ea}(h_{ea}-T_0s_{ea})]} = \frac{1961,49}{5773,63} = 0,34 = 34\%$$

$$\Psi_C = 34\%$$

- Calcul de l'efficacité exergetiques de la cuve de matière:

$$\Psi_{CM} = \frac{Ex_{ds}}{Ex_{de}} = \frac{\dot{m}_m Ex_m + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v}{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{pm} Ex_{pm}}$$

$$\Psi_{CM} = \frac{[\dot{m}_m(h_m-T_0s_m) + \dot{m}_{ec}(h_{ec}-T_0s_{ec}) + \dot{m}_v(h_v-T_0s_v)]}{[\dot{m}_{vc}(h_{vc}-T_0s_{vc}) - \dot{m}_{pm}(h_{pm}-T_0s_{pm})]} = \frac{246,5}{1835,7} = 0,1342 = 13,42\%$$

$$\Psi_{CM} = 13,42\%$$

- Calcul de l'efficacité exergetiques de la cuve d'ébullition:

$$\Psi_{CE} = \frac{Ex_{ds}}{Ex_{de}} = \frac{\dot{m}_{ms} Ex_{ms} + \dot{m}_{ec} Ex_{ec} + \dot{m}_v Ex_v}{\dot{m}_{vc} Ex_{vc} + \dot{m}_{me} Ex_{me}}$$

$$\Psi_{CE} = \frac{\dot{m}_{ms}(h_{ms}-T_0s_{ms}) + \dot{m}_{ec}(h_{ec}-T_0s_{ec}) + \dot{m}_v(h_v-T_0s_v)}{\dot{m}_{vc}(h_{vc}-T_0s_{vc}) + \dot{m}_{me}(h_{me}-T_0s_{me})} = \frac{374,27}{1915,98} = 0,1953 = 19,53\%$$

$$\Psi_{CE} = 19,53$$
