

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



Département de Génie Chimique
Mémoire de Master en Génie Chimique

Thème :

Dimensionnement thermique d'une chaudière à déchets ménagers pour la production de 60 t/h de vapeur

Proposé et dirigé par :

M^r : BENNOUR Hocine

M^r : AHMED ZAID Toudert

Présenté par :

M^{lle} : RAHAL Narimane

Soutenu le 14 Juin 2015 devant le jury composé de :

Présidente :

M^{me} : R . DERRICHE

Professeur à l'ENP

Examineurs :

M^{me} : F. MEZIANI

M. A. A à l'ENP

M^r : R . BOUARAB

Professeur à l'ENP

Promotion Juin 2015

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Pasteur Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger (Algérie)
Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax : 213 21 52 29 73
www.enp.edu.dz

Remerciements

Toutes les personnes m'ayant permis de mener à bien ce travail sont assurées de ma gratitude.

Je tiens à remercier particulièrement mes encadreurs Messieurs Bennour Hocine et Ahmed Zaid Toudert, pour leur soutien constant, leurs précieux conseils et leur disponibilité exceptionnelle tout au long de cette recherche.

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

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

Mes remerciements s'adressent enfin aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer à la soutenance.

Je remercie sincèrement la Présidente Madame Derriche et Madame Meziani, Monsieur Bouarab d'avoir accepté d'évaluer mes travaux en qualité d'examineurs.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, que tous ceux qui ont su me soutenir durant sa préparation, que toutes ces personnes trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.

Dédicaces

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

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

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

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

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

Aux membres du club d'activités polyvalentes qui a rythmé mes années à l'Ecole Nationale Polytechnique, plus particulièrement l'équipe du projet TEDxENP 2015(Salim,Sadek,Abderrahmen,Souad,Lyes et tous les autres)

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

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

Je dédie ce mémoire

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تحليل إحتراق النفايات المنزلية في المرجل و تحديد الخصائص الحرارية الملائمة لإنتاج 60 طن من البخار المسخن في الساعة تحت درجة حرارة 375 م° و ضغط 32 بار. يقوم المرجل المختار بإستهلاك 20 طن من النفايات في الساعة ، بحيث يقوم كل فرن من الفرنين المتواجدين داخل المرجل بحرق 10 أطنان من النفايات في الساعة بشكل متواز. لقد قمنا بإنجاز الرسوم البيانية لدرجات الحرارة داخل مبادلات المرجل و تقدير مساحات التبادل لهاته المبادلات بالإضافة إلى تحديد الأبعاد الرئيسية للفرنين.

كلمات مفتاحية:

حرق- نفايات منزلية - مرجل – خصائص حرارية.

Résumé :

Ce travail a pour objectif d'analyser la combustion de déchets ménagers dans une chaudière et d'en déterminer les caractéristiques thermiques les plus adaptées à une production de 60 tonnes de vapeur surchauffée par heure à une température de 375 °C et sous une pression de 32 bars. La chaudière retenue consommera 20 tonnes de déchets par heure et sera associée à deux fours incinérant chacun 10 tonnes de déchets par heure en fonctionnement parallèle. Les profils des températures à travers les échangeurs de la chaudière ont été établis, les surfaces d'échange de ces derniers évaluées, ainsi que les dimensions principales des fours.

Mots clés :

Combustion- déchets ménagers– chaudière-caractéristiques thermiques

Abstract

This work aims to analyze the combustion of household waste in a boiler and determine the most appropriate thermal characteristics for a production of 60 tons per hour of superheated steam at a temperature of 375 °C and a pressure of 32 bar. The selected boiler will consume 20 tons of waste per hour and will be associated with two ovens; each one will incinerate 10 tons of waste per hour in parallel operation. Temperature profiles through the heat exchangers in the boiler have been established, exchange surfaces and the main dimensions of the ovens have been evaluated.

Key words:

Combustion- household waste- boiler -thermal characteristics

Table des matières

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES	IV
NOMENCLATURE	V
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES DECHETS	4
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 DEFINITION	5
I.2.1 Classification des déchets selon leur nature	5
I.2.2 Classification des déchets selon leur origine, leur mode de collecte	6
I.2.3 Les déchets ménagers.....	6
I.3 LES DECHETS MENAGERS EN ALGERIE	7
I.4 VALORISATION DES DECHETS MENAGERS	8
I.5 VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS MENAGERS	10
I.6 INCINERATION DES ORDURES MENAGERES	10
I.7 CARACTERISTIQUES DES ORDURES MENAGERES PRISES EN COMPTE LORS DE L'INCINERATION	11
I.8 COMPOSANTS TECHNIQUES D'UNE INSTALLATION D'INCINERATION DES DECHETS	12
I.9 FONCTIONNEMENT D'UNE UNITE D'INCINERATION D'ORDURES MENAGERES	13
I.10 TRAITEMENT DES REJETS ISSUS DE L'INCINERATION DES DECHETS	15
I.10.1 Dispositifs de traitement des fumées	15
I.10.2 Le devenir des REFIOM (Résidus de l'Épuration des Fumées de l'Incineration des Ordures Ménagères).....	16
I.10.3 Le devenir des Mâchefers.....	16
I.11 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'INCINERATION DES DECHETS.....	16
I.12 CONCLUSION	17
CHAPITRE II : COMBUSTION DES DECHETS MENAGERS	18
II.1 INTRODUCTION	19
II.2 CHAUDIERE ET CHAMBRE D'INCINERATION	19
II.3 GRILLE D'INCINERATION	20
II.4 DESCRIPTION DETAILLEE DE LA COMBUSTION SUR GRILLE	22
Grilles refroidies :	22
II.4.1 Chambre de combustion :	23
II.4.2 Zone de convection	26
II.5 DETERMINATION DE LA COMPOSITION DU DECHET	27
II.6 COMPOSITION DES DECHETS DE CETTE ETUDE	27
II.7 COMBUSTION DES DECHETS.....	29
II.7.1 Les réactions de la combustion.....	29
II.7.2 L'air théorique	29
II.7.3 Les pouvoirs calorifiques du combustible.....	31
II.7.4 L'excès d'air	31
II.7.5 Composition des fumées issues d'une combustion complète du déchet	32
II.8 CONCLUSION	35

CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT THERMIQUE DE LA CHAUDIERE	36
III.1 INTRODUCTION :	37
III.2 LE FOUR.....	37
III.2.1 Détermination de la température de flamme :.....	37
III.2.2 Détermination de la température des gaz à la sortie du four :.....	38
III.2.3 Critère pour éviter le régime d'ébullition en film dans les écrans :	41
III.2.4 Calcul de la chaleur mise en jeu au niveau de la chambre de combustion :.....	42
III.2.5 Calcul du flux de chaleur par unité de surface intérieure des tubes-écrans :	43
III.3 ZONE DE CONVECTION :	44
III.3.1 Calcul de la température des gaz à la sortie du surchauffeur T_2 :.....	45
III.3.2 Calcul de la température des gaz à la sortie de l'évaporateur T_3 :	45
III.3.3 Calcul de la température des gaz à la sortie de l'économiseur T_4 :	47
III.3.4 Calcul de la température des gaz à la sortie du réchauffeur d'air T_5 :.....	48
III.3.5 Calcul de la température des gaz à la sortie du préchauffeur d'eau T_6 :.....	48
III.4 DONNEES NECESSAIRES AUX CALCULS :.....	49
III.4.1 Calcul des chaleurs spécifiques.....	49
III.5 PROCEDURE DE CALCUL :	50
CHAPITRE IV : EXPLOITATION DES RESULTATS	52
IV.1 INTRODUCTION	53
IV.2 PRESENTATION DES RESULTATS	53
IV.2.1 Température de flamme et d'évacuation des gaz.....	53
IV.2.2 Températures des fumées à travers la zone de convection	54
IV.2.3 Choix des paramètres opératoires	55
IV.2.4 Tracé des profils de températures à travers la chaudière	57
IV.2.5 Estimation des dimensions principales du four	61
CONCLUSION GENERALE	66
BIBLIOGRAPHIE.....	68
ANNEXES	70

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 POUVOIR CALORIFIQUE DE QUELQUES COMBUSTIBLES	12
TABLEAU I-2 COMPOSITION DES FUMÉES DE COMBUSTION	15
TABLEAU I-3 NORMES RELATIVES AUX FUMÉES DE COMBUSTION	15
TABLEAU II-1 ANALYSE ÉLÉMENTAIRE DES OM DE L'ÉTUDE PAR TYPE.....	28
TABLEAU II-2 COMPOSITION MASSIQUE DU DÉCHET SUR MATIÈRE SÈCHE ET SUR BRUT	29
TABLEAU II-3 AIR THÉORIQUE POUR LA COMBUSTION DU DÉCHET BRUT	31
TABLEAU II-4 POUVOIRS CALORIFIQUES DU DÉCHET BRUT.....	31
TABLEAU II-5 COMPOSITION DES FUMÉES ISSUES DE LA COMBUSTION DU DÉCHET BRUT POUR DIFFÉRENTES VALEURS DU RAPPORT D'AIR THÉORIQUE A	34
TABLEAU III-1 PROPRIÉTÉS DE L'EAU ET DE LA VAPEUR D'EAU.....	50
TABLEAU IV-1 DONNÉES NÉCESSAIRES POUR LE TRACE DU PROFIL DE TEMPÉRATURES POUR MC=20 T/H.....	58
TABLEAU IV-2 DONNÉES NÉCESSAIRES POUR LE TRACE DU PROFIL DE TEMPÉRATURES POUR	59
TABLEAU IV-3 DONNÉES NÉCESSAIRES AU CALCUL DU RENDEMENT.....	60
TABLEAU IV-4 CALCUL DU RENDEMENT POUR MC=20 T/H ET MC =21 T/H	61
TABLEAU IV-5 VALEURS TYPIQUES DU COEFFICIENT DE CONVECTION CÔTÉ GAZ	63
TABLEAU IV-6 RÉSULTATS DU CALCUL DES CONDUCTANCES THERMIQUES ET DES SURFACES D'ÉCHANGE DE CHALEUR	64

Liste des figures

FIGURE I-1 EVOLUTION DE LA PRODUCTION DES DMA EN ALGERIE.....	8
FIGURE I-2 TECHNIQUES DE VALORISATION DES DECHETS MENAGERS	9
FIGURE I-3 EQUIVALENT D'UNE TONNE D'ORDURES MENAGERES	10
FIGURE I-4 PRINCIPE GENERAL D'UNE UIOM (UNITE D'INCINERATION DES ORDURES MENAGERES)	12
FIGURE II-1 SCHEMA DU FOUR A GRILLE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE II-2 SCHEMA DU FOUR TOURNANT	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE II -3 GRILLES D'INCINERATEURS	21
FIGURE II-4 SCHEMA D'UNE CHAMBRE D'INCINERATION	23
FIGURE II-5 SCHEMA DES DIFFERENTS TYPES D'ECRANS D'EAU	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE II-6 DIFFERENTS TYPES DE CIRCULATION A TRAVERS LA GRILLE D'UN FOUR	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE III-1 SCHEMA DE LA ZONE DE RAYONNEMENT.....	39
FIGURE III-2 COUPE TRANSVERSALE DE LA PAROI A MEMBRANE	43
FIGURE III-3 SCHEMA DE LA ZONE DE CONVECTION.....	44
FIGURE III-4 SCHEMA DU SURCHAUFFEUR	45
FIGURE III-5 SCHEMA DES ECRANS D'EAU.....	45
FIGURE III-6 SCHEMA DE L'EVAPORATEUR	46
FIGURE III-7 SCHEMA DE L'ECONOMISEUR	47
FIGURE III-8 SCHEMA DU RECHAUFFEUR D'AIR	48
FIGURE III-9 SCHEMA DU PRECHAUFFEUR D'EAU.....	48
FIGURE IV-1 VARIATION DE LA TEMPERATURE DE FLAMME EN FONCTION DE L'EXCES D'AIR.....	53
FIGURE IV-2 VARIATION DE LA TEMPERATURE DE FLAMME ET DE LA TEMPERATURE D'EVACUATION DES GAZ EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR.....	54
FIGURE IV-3 VARIATION DES TEMPERATURES DES FUMEEES A TRAVERS LA ZONE DE CONVECTION	55
FIGURE IV-4 TRACE DES PROFILS DE TEMPERATURE A TRAVERS LA CHAUDIERE POUR MC=20 T/H ET $\Lambda=50\ 000\ \text{BTU}/(\text{FT}^2\cdot\text{H})$	59
FIGURE IV-5 TRACE DES PROFILS DE TEMPERATURE A TRAVERS LA CHAUDIERE POUR MC=21 T/H ET $\Lambda=50\ 000\ \text{BTU}/(\text{FT}^2\cdot\text{H})$	60

Nomenclature

Variable	Désignation	Unité
A	Surface d'échange	$[m^2]$
A_e	Surface réelle de la paroi du côté extérieur	$[ft^2]$
A_g	Surface utile de la grille	$[m^2]$
A_P	Surface projetée de l'enceinte du four	$[ft^2]$
A_t	Air théorique	[kg d'air/kg de combustible]
\bar{A}	Grandeur exprimée par Kmol de substance	[./Kmol]
C_p	Chaleur spécifique	[kJ/kg K]
E_i	Quantité d'énergie transférée au niveau du système i	$[\frac{kJ}{h}]$
H	Hauteur du four	$[m]$
M	Masse molaire	[kg/kmol]
P	Pression	[bar]
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	[kJ/Kg]
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	[kJ/Kg]
\dot{Q}	Taux de transfert de chaleur	[kJ/s]
\dot{Q}_F	Chaleur reçue au niveau des écrans d'eau	[kJ/s]
R	Constante des gaz parfait	[kJ/kmol °C]
T_c	Température de flamme	[°F]
T_e	Température à laquelle les gaz quittent le four	[°C]
T_g	Température avec laquelle les gaz rayonnent	[°R]
T_s	Température de la surface des écrans	[°R]
U	Coefficient d'échange de chaleur global	$[\frac{kW}{m^2 \cdot ^\circ C}]$
W	Teneur massique en eau	[-]
\dot{W}	Puissance utile	[kW]
Z	Fraction massique	[%]

h	Enthalpie spécifique	[kJ/Kg]
h_0	Coefficient de convection côté gaz	$\left[\frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}\right]$
h_{fg}	Enthalpie de vaporisation de l'eau	[kJ/Kg]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
m_f	Pouvoir fumigène du combustible	[kg de fumées /kg de combustible]
\dot{q}	Flux par unité de surface	[Btu/ft ² h]
x	Titre de la vapeur	
x_i	Composition massique du constituant i	[%]
y	fraction molaire	[%]
ΔT_m	Différence de température moyenne logarithmique	[°C]

Variables Grec

Δ	Chute d'un paramètre	[-]
α	Rapport d'air théorique	[-]
ε_s	Emissivité de la paroi	[]
ε_g	Emissivité des gaz de combustion	[]
σ	Constante de Stephan Boltzmann	$\frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ R}$
λ	Densité surfacique de la charge calorifique de la chaudière	$\frac{Btu}{h \cdot ft^2}$
η	Rendement	[%]
γ	Facteur de charge volumique du four	$\frac{Btu}{h \cdot ft^3}$
φ_i	Pourcentage d'énergie allouée au système i	[%]

Indices

f	Fumées
c	Combustible
a	Air
i	Constituant

g	Gaz de combustion
v	Vapeur
e	Eau
P	purges
p	Préchauffeur d'eau
r	Réchauffeur d'air
e	Economiseur
v	Evaporateur
s	Surchauffeur
c	Ecrans d'eau

Unités

Nm³

m³ à T=25 °C et P= 1atm

Abréviation :

OM	Ordures ménagères
DIB	Les déchets industriels banals
DIS	Déchets industriels spéciaux
CET	Centre d'Enfouissement Technique
CSDU	Centres de Stockage des Déchets Ultimes
OMR	Ordures ménagères résiduelles
TEP	Tonne Equivalent Pétrole
UIOM	Usine d'incinération des Ordures ménagères
POP	Polluants organiques persistants
REFIOM	Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères

Introduction générale

Introduction générale

Dans le contexte actuel d'épuisement des ressources fossiles conventionnelles, de réchauffement climatique et autres impacts environnementaux majeurs, une transition énergétique est en cours : De nouvelles sources d'énergie apparaissent et ce, pour réduire la dépendance au trio d'énergie pétrole-charbon-gaz

Il existe une ressource que nous produisons au rythme de 1,3 milliards de tonnes par an[1], une ressource dont le gisement semble inépuisable ; cette ressource n'a rien de miraculeux, elle vient directement de nos poubelles : Toute activité humaine s'accompagne d'une production de déchets issus de l'industrie, du domaine agricole, sanitaire, du bâtiment, des ménages, et leur gestion n'est pas toujours évidente.

A l'inverse des déchets produits par l'industrie pris en charge d'une manière ou d'une autre, le devenir des déchets ménagers n'est pas tout le temps synonyme de valorisation matière ou énergétique, se retrouvant au niveau des décharges contrôlées au meilleur des cas. En référence au contexte algérien, un algérien habitant un grand centre urbain produit en moyenne 1,2 kg d'ordures ménagères par jour [2] et il y a lieu de constater que les conditions de ramassage, d'évacuation et d'élimination de ces déchets se détériorent de jour en jour,

Le traitement thermique est un moyen prometteur pour résoudre le problème de l'accumulation des ordures ménagères. En effet, l'incinération permet à la fois de réduire les volumes des déchets ménagers et de valoriser énergétiquement par une combustion efficace, sous forme de chaleur, d'électricité ou les deux.

Le pouvoir calorifique des déchets ménagers, relativement bas comparativement à celui des combustibles traditionnels, fait que leur combustion répondrait aux besoins d'industries plutôt adaptées à la cogénération telles que .les papeteries, les sucreries,...

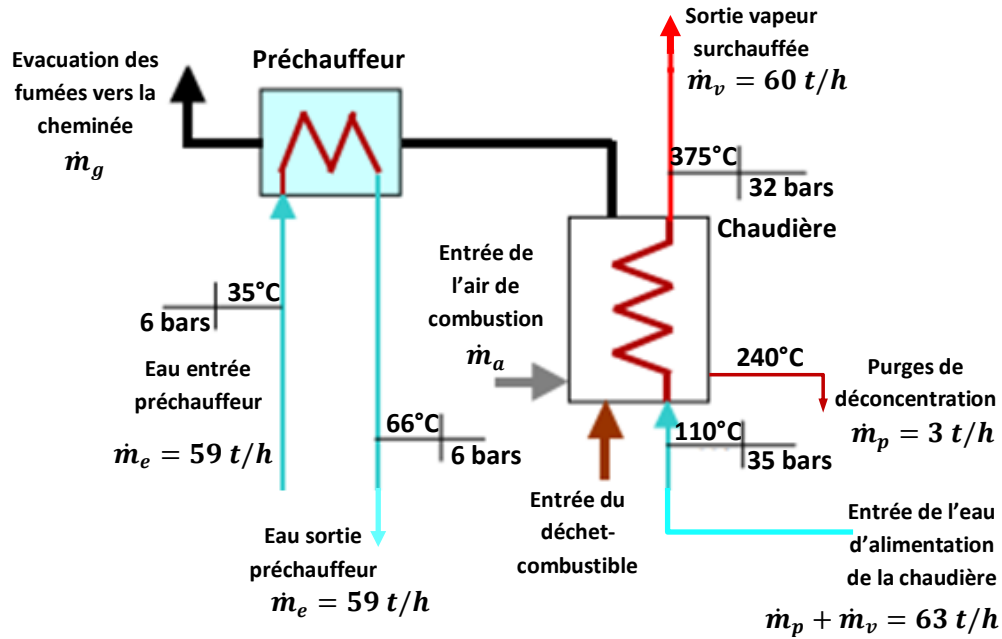
Cette étude a pour but le dimensionnement thermique d'une chaudière produisant 60 t/h de vapeur qui, couplée à une production d'électricité, et après auto-consommation, correspond à la consommation d'électricité domestique d'une ville d'environ 50 000 habitants [3]. L'eau chaude résiduaire peut également alimenter un réseau de chaleur utilisé pour du chauffage collectif (particuliers, établissements publics, industriels, installations agricoles).

Ce travail débutera par un chapitre qui sera consacré à la présentation de quelques notions sur les déchets ménagers et le concept de valorisation énergétique de ces derniers.

Le second chapitre nous permettra de caractériser le combustible de cette étude et de choisir les principaux équipements permettant sa combustion.

Le schéma du système à étudier est présenté à la figure ci-dessous :

Introduction générale



Le chapitre 3 traitera de l'analyse énergétique du système, les bilans thermiques y seront établis pour le four les différents échangeurs et une analyse sera menée pour déterminer les paramètres opératoires adaptés au problème.

Au niveau du chapitre 4, les résultats de l'analyse seront exploités et devront aboutir notamment à la quantité de combustible nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques cités et au choix des paramètres opératoires qui permettraient de réaliser au mieux cet objectif.

La conclusion portera sur l'impact de la valorisation énergétique des déchets ménagers et l'intérêt de son développement en Algérie.

Chapitre I : Généralités sur les déchets

I.1 Introduction

A l'heure où les ressources naturelles se raréfient, la population augmente et le prix des matières premières s'envolent. Au moment où notre mode de consommation suit un rythme effréné, où notre seul mot d'ordre est "*extraire-fabriquer-jeter*», la mise en place d'une stratégie alternative est plus qu'une urgence.

Il est donc grand temps de réviser notre mode de consommation et de production. "*Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*", disait Lavoisier. Adage qui doit attirer notre attention sur l'évidence que la valorisation énergétique peut être une source d'approvisionnement en énergie.

Bien que cela puisse à priori surprendre, il ne fait plus aucun doute qu'il y a de l'énergie dans nos déchets. La valorisation énergétique d'un déchet permet de le transformer en chaleur et/ou en électricité. Elle représente même la troisième source de production d'électricité alternative après l'hydraulique et l'éolien [4].

Une tonne de déchets ménagers peut produire jusqu'à 700 kWh d'électricité ou encore 1500 kWh de chaleur. [5] Cette voie de valorisation de nos déchets nous apporte de l'énergie tout en nous débarrassant de ce qui jusqu'alors nous embarrassait. Elle permet à la fois de réaliser des économies de combustibles conventionnels non renouvelables, de matières premières et de réduire le prix du traitement des déchets urbains.

I.2 Définition

Un tour d'horizon sur les déchets ménagers s'impose, revenons tout d'abord à la définition d'un déchet :

On appelle **déchet** tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, ou bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer. [6]

Les déchets peuvent être classés selon leur nature (dangereux, non dangereux, inertes) ou bien selon leur origine (déchets ménagers, déchets industriels).

I.2.1 Classification des déchets selon leur nature

-Les déchets dangereux : Déchets qui contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux pouvant avoir un impact sur la santé humaine et l'environnement. Ils peuvent être de nature organique (solvants, hydrocarbures...), minérale (acides, boues d'hydroxydes métalliques...) ou gazeuse.

-Les déchets non-dangereux : Ces déchets sont, pour certains, recyclables (bois, emballages ménagers, métaux ferreux, plastiques, verre, papier...), pour d'autres, compostables ou biodégradables (biodéchets, déchets verts...). Il peut s'agir également de sous-produit issu du traitement des déchets.

-Les déchets inertes : Ce sont les déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique avec l'environnement. Ils ne sont pas biodégradables et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement. Les déchets inertes sont issus de l'industrie extractive et du secteur de la construction et des

travaux publics. Les matériaux minéraux (pierre, marbre, grès, ardoise...), le béton, les briques, le verre ou encore la terre en font partie.

I.2.2 Classification des déchets selon leur origine, leur mode de collecte

- **Les déchets industriels** : Ce sont des déchets dangereux, inertes ou banals, résultant d'une activité de production artisanale, commerciale, industrielle ou tertiaire, dont l'élimination doit être assumée financièrement par leurs producteurs. Cette catégorie regroupe :

- *Les déchets industriels banals (DIB)*: Les DIB sont en général composés de papiers, cartons, plastiques, bois, métaux, verres, matières organiques, végétales ou animales, résultant de l'utilisation d'emballages, de rebuts ou de chutes de fabrication ;

- *Les déchets industriels spéciaux (DIS)*: Ce sont des déchets dont l'élimination nécessite des précautions particulières de protection de l'environnement. Ils font l'objet d'un contrôle administratif renforcé en matière de stockage, transport, prétraitement et élimination. Ils se composent notamment de déchets :

- contenant des substances telles que l'amiante, l'arsenic, le plomb, etc. ;
- constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures, de produits de vidange ;
- provenant de l'industrie pétrolière, chimique, pharmaceutique et phytopharmaceutique ;
- provenant des ateliers de traitement de surfaces ;

- *Les déchets inertes* : Déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. La production totale de lixiviats et la teneur des déchets en polluants ainsi que l'écotoxicité des lixiviats doivent être négligeables et, en particulier, ne doivent pas porter atteinte à la qualité des eaux de surfaces et/ou des eaux souterraines

I.2.3 Les déchets ménagers

Ils regroupent les déchets produits par les ménages sur leur lieu d'habitation, qui ne présentent pas de caractère dangereux et ne comportent aucun risque pour l'homme ou l'environnement.

Ces déchets excluent donc les déchets dangereux des ménages.

- *Ordures ménagères non recyclables* : Ce sont les déchets provenant de l'activité des ménages : préparation des aliments, nettoyage des habitations, etc.

- *Ordures ménagères recyclables* : Ces déchets recyclables sont produits par les ménages et comprennent les déchets en papier et en carton, les déchets d'emballage en plastique et en métal, et les déchets d'emballage en verre.

- Déchets ménagers spéciaux : qui regroupent :

Les déchets végétaux : Les déchets d'origine végétale ou déchets verts sont généralement les déchets issus de l'entretien des cours et jardins des particuliers (notamment les déchets issus de l'élagage ou de la taille de haies, tontes de pelouse, etc.).

Gravats et déblais domestiques : Tous les appareils fonctionnant à partir de courants électriques ou de champs électromagnétiques (petit et gros électroménager, équipements informatiques et de télécommunication, outils électriques, jouets, etc.).

Déchets encombrants

Ferrailles

Déchets dangereux des ménages : Ils regroupent les déchets des ménages présentant un caractère dangereux ou un risque pour l'homme et l'environnement. Seringues et tout autre objet ayant servi aux soins d'une personne ou d'un animal, autres que les médicaments non utilisés et leurs emballages qui sont à remettre dans toutes les officines pharmaceutiques.

Autres déchets dangereux des ménages : Produits inflammables, toxiques, corrosifs, explosifs ou ayant d'autres propriétés qui font qu'ils ne peuvent être mélangés aux ordures ménagères sans créer de risques pour les personnes et l'environnement : acides et bases, bombes aérosols non vides, extincteurs, peintures, vernis, teintures, lampes halogènes et néons, mastics, colles et résines, produits d'hygiène (cosmétiques, thermomètres, etc.), produits phytosanitaires, de traitement du bois et des métaux, diluants, détergents, détachants ou solvants, graisses, huiles végétales et hydrocarbures, piles, batteries, etc.

I.3 Les déchets ménagers en Algérie [7]

L'Algérie compte 3000 décharges sauvages. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares.

Chaque année 200 000 tonnes de déchets d'emballages sont rejetés en Algérie. Les plastiques et les cartons constituent 95% de ces emballages et les métaux représentent les 5% restants.

Des 200 000 tonnes de déchets d'emballages rejetés annuellement, seulement 4000 tonnes sont récupérées soit 2% du gisement.

Chaque année, 22000 tonnes de déchets d'activités de soins sont produits en Algérie.

Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 300 centres d'enfouissement technique et décharges contrôlées. Déjà 90 projets sont achevés ou en voie d'achèvement.

Il existe en Algérie 317 incinérateurs opérationnels pour la destruction des déchets d'activités de soins.

En 2008, il y avait 873 récupérateurs agréés et répartis sur l'ensemble du territoire national. Ce chiffre est en augmentation continue.

En 2008, il y avait 320 exportateurs de déchets ferreux et non ferreux répartis sur l'ensemble du territoire national. (Association des exportateurs de métaux ferreux)

L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers.

En Algérie, la quantité de déchets ménagers et assimilés a connu une augmentation substantielle au cours des dernières décennies en raison d'une croissance démographique galopante conjuguée à une urbanisation non maîtrisée. Elle est estimée à environ 10,3 MT en 2013. Cette production dépassera 12 MT en 2020 et approchera les 17 MT en 2030.(6)

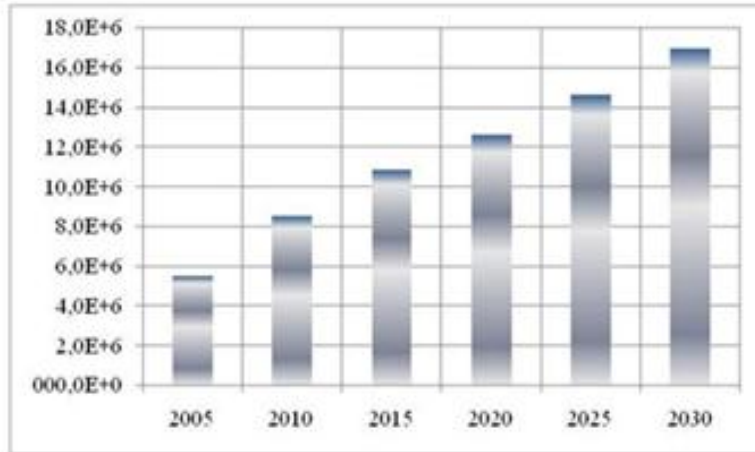
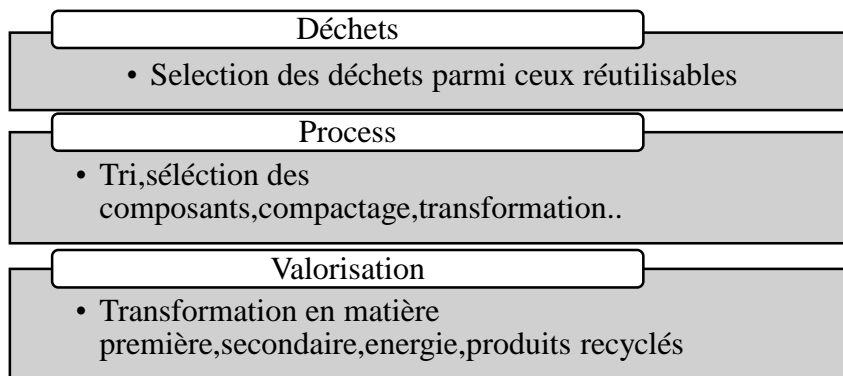


Figure I-1 Evolution de la production des DMA en Algérie

I.4 Valorisation des déchets ménagers

On peut distinguer deux grandes familles de valorisation: La valorisation matière qui consiste à recycler le produit et la valorisation énergétique qui permet de récupérer de l'énergie (chaleur, électricité) à partir d'un déchet.



La valorisation matière comprend :

Le Recyclage : réintroduction d'un déchet dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

Le Réemploi : nouvel emploi du déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation.

La Régénération : procédé physique ou chimique qui redonne à un déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en remplacement d'une matière première vierge.

La Réutilisation : utilisation d'un matériau récupéré pour un usage différent de son premier emploi, ou introduction de ce matériau dans un autre cycle de production que celui dont il est issu.



Figure I-2 Techniques de valorisation des déchets ménagers

La valorisation énergétique : consiste à récupérer l'énergie du déchet en l'incinérant. Celle-ci peut prendre trois formes:

L'incinération avec récupération d'énergie : Sous forme de vapeur ou d'électricité.

La valorisation et production de Biogaz : Par le biais de la récupération du biogaz produit dans les décharges ;

La méthanisation des déchets organiques et des boues de station d'épuration (fermentation qui produit du biogaz).

Le stockage : si le déchet ne peut être valorisé, il est alors stocké dans des centres de stockage

adaptés à sa dangerosité : les Centres de Stockage des Déchets Ultimes (CSDU), anciennement Centre d'Enfouissement Technique (CET).

I.5 Valorisation énergétique des déchets ménagers [8]

Au regard de la pénurie constante des matières premières énergétiques (gaz, pétrole,...), il est nécessaire de trouver des sources d'énergie alternatives. Les déchets ménagers en sont l'exemple concret. Exploitable pour la production d'électricité et de chaleur, ils représentent donc une source d'énergie renouvelable.



Figure I-3 Equivalent d'une tonne d'ordures ménagères

1 Tep = 10 000 thermies = 11,6 MWhth

1 Baril = 159 L = 137 kg

I.6 Incinération des ordures ménagères

L'incinération des déchets est un traitement thermique qui utilise des procédés de combustion ou de thermolyse. La méthode la plus employée actuellement, la combustion, s'effectue dans des fours adaptés.

Elle permet de réduire le volume des déchets (d'environ 90 %) et de diminuer en conséquence la part destinée à l'enfouissement.

La combustion : Incinération des déchets suivant une oxydation des matériaux combustibles qu'ils renferment dans leur composition. Les déchets sont généralement des matériaux hautement hétérogènes, composés essentiellement de substances organiques, de minéraux, de métaux et d'eau.

Lors de l'incinération, des gaz brûlés sont générés, lesquels contiennent la majorité de l'énergie combustible disponible sous forme de chaleur. Les substances combustibles dans les déchets brûleront lorsqu'elles auront atteint la température d'inflammation nécessaire et seront entrées en contact avec l'oxygène.

Les processus de combustion ont réellement lieu dans la phase gazeuse, en quelques secondes, et libèrent de l'énergie lorsque les conditions d'inflammabilité (température et apport en oxygène suffisants) sont réalisées ; dès lors, des réactions en chaîne permettent à la combustion de s'auto-entretenir. Les étapes principales du processus d'incinération sont :

1. **Séchage et dégazage** : Ici, le contenu volatil (par ex. les hydrocarbures et l'eau) évolue à des températures généralement situées entre 100 et 300 °C. Le processus de séchage et de dégazage n'ont pas besoin d'agents oxydants et dépendent seulement de la chaleur apportée.

2. **Pyrolyse et gazéification** : La pyrolyse est la décomposition supplémentaire des substances organiques en l'absence d'agent oxydant à environ 250 - 700 °C. La gazéification des résidus carbonés est la réaction des résidus avec la vapeur d'eau et le CO₂ à des températures, typiquement entre 500 et 1000 °C, mais peut se produire à des températures allant jusqu'à 1600 °C. Ainsi, la matière organique solide est transférée vers la phase gazeuse. En plus de la température, l'eau, la vapeur et l'oxygène soutiennent cette réaction

3. **Oxydation** : Les gaz combustibles générés lors des étapes précédentes sont oxydés, selon la méthode d'incinération choisie, à des températures de gaz brûlés généralement entre 800 et 1450 °C.

I.7 Caractéristiques des ordures ménagères prises en compte lors de l'incinération

-Le Pouvoir Calorifique

Le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur que dégage la combustion complète d'une quantité déterminée d'un combustible quelconque pris, comme son comburant, à une température donnée (habituellement 0°C ou 25°C). Les produits de la combustion étant eux même ramenés aux conditions initiales de températures, et de pression ou de volume.

Généralement, les produits de la combustion renferment de la vapeur d'eau qui provient :

-De l'humidité initiale du combustible

-De l'humidité de l'air

-De la réaction de combustion elle-même lorsque celle-ci contient de l'hydrogène sous quelque forme que ce soit.

Cette vapeur d'eau peut être condensée afin de récupérer sa chaleur latente. C'est pourquoi, le pouvoir calorifique peut être :

Un Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) : Quantité de chaleur récupérée après une combustion complète suivie du refroidissement des produits de la combustion à la température à laquelle on a introduit les réactifs, si l'eau résultant de la combustion de l'hydrogène se trouve alors à l'état condensé. (dans ce cas, la chaleur latente de condensation est récupérée).

Un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) : Quantité de chaleur récupérée après une combustion complète suivie du refroidissement des produits de la combustion à la température à laquelle on a introduit les réactifs, si l'eau reste à l'état vapeur dans les produits de la combustion.

Donc on a:

$$PCS = PCI + \text{chaleur latente de la vapeur produite lors de la combustion}$$

Exemples de pouvoirs calorifiques inférieurs:

Tableau I-1 Pouvoir calorifique de quelques combustibles [9]

Combustible	PCI en MJ/kg
Super carburant	46,6
Fioul domestique	42,6
Fioul lourd	40,3
Charbon	23,0 à 30,0
Bois	8,0
Déchets industriels	12,5 à 33,4
Bagasse	11,7
Déchets de bois	8,4
Déchets ménagers	6,3 à 12,5

-Le taux d'humidité

Les déchets ménagers renferment une quantité d'eau qui est celle contenue dans leurs composants. La teneur globale en eau est essentiellement fonction des proportions respectives des composants, ainsi que des saisons, des attitudes et de l'origine géographique et sociale des populations qui en sont la source.

I.8 Composants techniques d'une installation d'incinération des déchets

Les incinérateurs comprennent généralement un lot complexe de composants techniques qui interagissent entre eux et qui, lorsqu'on les considère ensemble, effectuent le traitement global des déchets

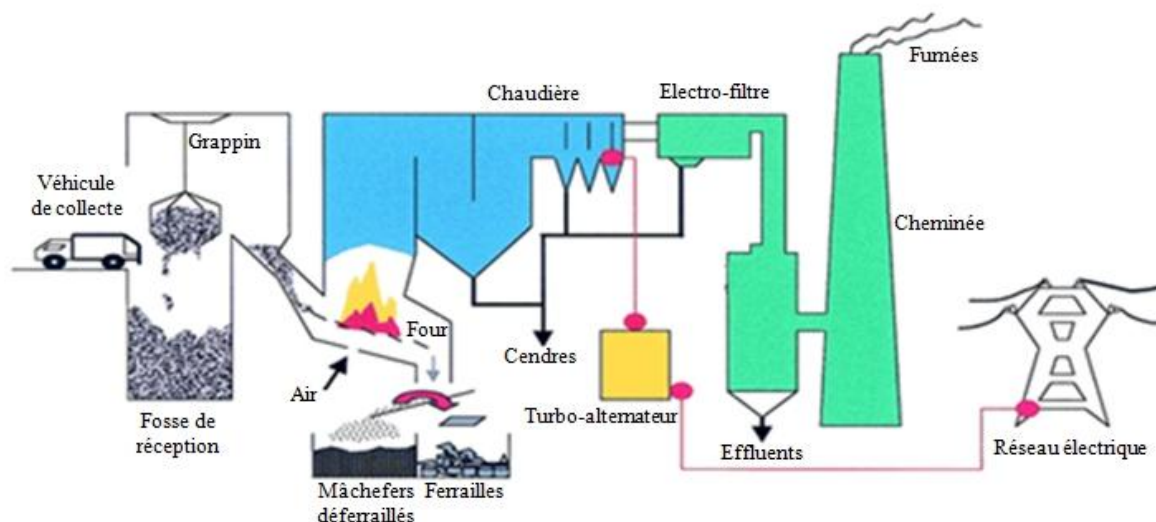


Figure I-4 Principe général d'une UIOM (Unité d'Incinération des Ordures Ménagères)

Une usine d'incinération d'ordures ménagères comprend les blocs suivants:

- Une fosse de réception et de stockage des déchets,
- Un ensemble trémie-goulotte de chargement et d'alimentation du four,
- Un dispositif de chargement des déchets dans le four (poussoir pneumatique ou alimenteur à tiroirs),
- Une surface de chauffe (grille), le plus souvent inclinée et équipée de dispositifs de débrassage de la charge et de décentrage,
- Un ensemble de ventilateurs assurant l'injection d'air primaire (sous la grille), d'air secondaire (chambre de post-combustion),
- Un dispositif d'évacuation des mâchefers en extrémité de grille,
- Une chambre de post-combustion située au-dessus de la grille,
- Une chaudière permettant de récupérer une partie de la chaleur dégagée par la combustion,
- Un système d'épuration des fumées et de traitement des gaz de combustion (électro-filtres, tours de lavage...),
- Une cheminée

I.9 Fonctionnement d'une unité d'incinération d'ordures ménagères [10]

Les déchets traités dans un incinérateur arrivent par camion et sont déversés dans une fosse. Suivant les installations, un tri préalable peut avoir été effectué soit pour en retirer une partie du métal soit pour avoir des ordures plus homogènes, ce qui facilite la combustion. Il est nécessaire de stocker des déchets dans la fosse car l'incinérateur doit fonctionner en permanence pour assurer un rendement optimal. Le processus est donc continu et est d'ailleurs peu souvent interrompu par des incidents

Les déchets sont, dans un premier temps, déchargés dans la fosse de stockage. La mise en dépression de cette dernière permet d'éviter la dispersion des poussières, papiers et odeurs à l'extérieur du bâtiment lors des manœuvres de déchargement et reprise des ordures. Les ordures ménagères sont ensuite amenées par bras mécanique jusqu'à la trémie d'alimentation du four. Les déchets sont alors déversés dans l'enceinte du four ou chambre de combustion. Ils sont poussés sur la grille où ils subissent des étapes de séchage, gazéification, combustion, pyrolyse. La température au niveau du lit de déchets peut atteindre jusqu'à 1100°C en haut de la grille et 950°C en bas de la grille. Certaines grilles du four sont constituées de barreaux fixes et mobiles qui régulent le transit des déchets. En effet, le brassage et la progression des ordures sur la grille sont contrôlés par un réglage de la vitesse de la grille. Celui-ci doit également maintenir la couche d'ordures à une épaisseur constante. Ce qui permet : - d'éviter les imbrûlés en fin de parcours (combustion complète), - de protéger la grille des surchauffes locales.

En fin de parcours, les déchets ménagers doivent être entièrement brûlés et ne se présenter que sous forme de cendres ou de mâchefers. Pour entretenir la combustion, de l'air primaire, préchauffé, est injectée au niveau de la grille. Son rôle est multiple, il permet de : - sécher les ordures ménagères au niveau de la grille de séchage, - réduire la température des mâchefers avant leur évacuation, - refroidir les barreaux de grilles. De l'air est également injecté dans les parties hautes de la chambre de combustion. Cet air dit "secondaire" permet : - de réduire la teneur en monoxyde de carbone (CO) des fumées et d'assurer la combustion complète des ordures, - de contrôler la position de la flamme par rapport aux parois du four évitant ainsi d'endommager ces parois, - par dilution, de réguler la température des fumées à l'entrée de la chaudière, c'est-à-dire de la zone de convection, - d'assurer un mélange efficace des différents gaz et leur bonne homogénéisation.

Le phénomène de post-combustion (ré-inflammation des gaz) dans la chaudière est ainsi évité. Les mâchefers, matériaux incombustibles collectés en phase solide en fin de combustion, sont refroidis par aspersion d'eau et peuvent être valorisés directement ou dirigés vers un centre de maturation (centre dans lequel sont stockés les mâchefers durant quelques semaines, temps nécessaire à l'accomplissement d'un phénomène de carbonatation, afin que ces derniers soient considérés comme valorisables). Les éléments ferreux et non ferreux sont extraits de ces mâchefers et sont recyclés en tant que matière première secondaire.

Produits de l'incinération : Parmi les sous-produits de l'incinération des déchets, nous citons:

- Des émissions atmosphériques (fumées) :

Poussières, métaux lourds (cadmium, mercure, plomb, arsenic...), gaz acides (HCl, HF, SOx) et oxydes d'azote (NOx), monoxyde de carbone, ainsi que dioxines et furanes (ces deux dernières sont considérées comme des Polluants Organiques Persistants (POP)).

-Des rejets liquides :

Eaux issues du traitement humide des fumées, eaux de lavage des sols, de refroidissement des mâchefers et de nettoyage des chaudières. Ces eaux doivent être épurées avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Les boues résiduelles d'épuration sont stockées en décharges de déchets dangereux.

-Des rejets solides :

Classés en deux catégories :

- *Les Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères (REFIOM) :* Ces déchets ultimes représentent 2 à 5% du tonnage incinéré. Ils sont stockés en tant que *déchets dangereux*, stabilisés en bloc de béton avant d'être enfouis.
- *Les mâchefers* (20 à 25% du tonnage):déchets solides de combustion, pouvant être réemployés en sous-couche routière, ou enfouis en centre de stockage de catégorie 2 (*déchets ultimes non dangereux*), quand la réduction de leur caractère polluant n'a pas permis de les valoriser.

I.10 Traitement des rejets issus de l'incinération des déchets

Les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) produisent actuellement entre 5000 et 6000 Nm³ de fumées par tonne incinérée.[11] Ces fumées présentent la composition moyenne suivante :

Tableau I-2 Composition des fumées de combustion [12]

Constituants	mg/Nm ³
Poussières	1 500 à 5 000
Monoxyde de Carbone (CO)	20 à 50
Acide chlorhydrique (HCl)	800 à 2 000
Dioxyde de Soufre (SO ₂)	20 à 200
Oxydes d'Azote (NO _x)	200 à 350
Acide fluorhydrique (HF)	0,5 à 2
Métaux lourds	5 à 10
Organo-chlorés (TE) (ng/Nm ³)	0,2 à 3

Les gaz, chargés de polluants, doivent subir un traitement adapté avant d'être rejetés dans le milieu atmosphérique. Le contexte réglementaire évolue à cet égard : il se traduit par des normes de plus en plus strictes en ce qui concerne les rejets de polluants dans l'atmosphère.

Les normes présentées au tableau I.3 ci-après sont données à titre indicatif

Tableau I-3 Normes relatives aux fumées de combustion [13]

Constituants	mg/Nm ³
Poussières	10
Carbone Organique Total	10
Acide Chlorhydrique	10
Oxydes de soufre	50
Oxyde d'Azote	200
Cadmium + Thallium	0,05
Mercure	0,05
Total autre métaux lourds	0,5
Dioxines ¹	0,1 ngTEO/Nm ³

I.10.1 Dispositifs de traitement des fumées

Plusieurs procédés, qui parviennent à une réduction de la teneur en polluants allant de 90 à 99,9 %, sont actuellement utilisés :

¹TEO : Des coefficients sont appliqués aux teneurs en dioxines afin d'estimer une teneur globale représentative de la toxicité

- *Les procédés "secs"* : un réactif (la chaux par exemple) est pulvérisé sur les fumées, qui sont ensuite dépoussiérées. Ainsi épurées, elles sont rejetées par la cheminée de l'incinérateur ;

- *Les procédés "semi-humides"* : un réactif liquide (le lait de chaux par exemple) est pulvérisé sur les fumées, qui sont ensuite rejetées après dépoussiérage ;

- *Les procédés "humides"* : les fumées subissent un dépoussiérage puis traversent un refroidisseur qui les sature en eau. Elles sont ensuite "lavées" par un réactif chimique avant d'être rejetées par la cheminée.

Le procédé humide est le plus efficace. Mais ces coûts d'investissement et de fonctionnement sont supérieurs aux autres procédés. Il produit en outre de nombreux effluents liquides qui doivent être traités. De ce fait, un processus supplémentaire s'avère nécessaire.

Le procédé sec, lui, possède un moins bon rendement que le procédé semi-humide. En outre, il consomme plus de réactifs et génère plus de résidus. Son coût d'investissement est cependant plus faible.

I.10.2 Le devenir des REFIOM (Résidus de l'Épuration des Fumées de l'Incinération des Ordures Ménagères)

Les REFIOM sont chargés de polluants que l'eau, par ruissellement, peut disséminer dans le milieu naturel. Par ailleurs, ils ne satisfont pas aux exigences de stockage. Les REFIOM doivent être stabilisés avant d'être stockés en installation de stockage de déchets dangereux.

I.10.3 Le devenir des Mâchefers

En sortie de four d'incinération, les mâchefers subissent généralement une étape de criblage et d'extraction des métaux ferreux et non ferreux qu'ils contiennent. Cette étape permet également d'aboutir à une qualité de mâchefers suffisante (propriétés physiques et mécaniques) pour permettre leur valorisation.

I.11 Avantages et inconvénients de l'incinération des déchets

Parmi les avantages de l'incinération des déchets ménagers on peut citer que :

- 70 % en masse et 90 % en volume de la quantité de déchets mis en décharge est réduite [14]

-L'incinération est adaptée à toute sorte de déchets ménagers et assimilés. Elle permet de tirer parti des déchets exclus des autres modes de traitement (produits souillés, trop petits, objets composites)

-Elle réduit la nocivité des déchets, elle stérilise par exemple les déchets médicaux.

-Via une production d'énergie, elle participe à la réduction de l'utilisation des ressources fossiles et des émissions de gaz à effet de serre induits. Ainsi, la valorisation d'une tonne de déchets peut permettre de produire jusqu'à 700 kWh d'électricité (en valorisation d'électricité seule) ou 1 500 kWh de chaleur (en valorisation thermique seule).[5]

A côté de cela, l'incinération des déchets présente quelques inconvénients parmi lesquels :

Généralités sur les déchets

- Emissions et polluants atmosphériques (dioxines et furanes, métaux lourds, gaz acides, poussières) sont générés au cours de la combustion.

-Impact que ces émissions peuvent avoir sur la santé (certains cancers ou troubles de la reproduction).

-L'énergie produite sous forme de chaleur n'est pas stockable.

-Libération dans l'atmosphère d'importantes quantités de poussières, de métaux lourds (Plomb, mercure, zinc...etc.) et de gaz chlorhydrique (HCl) extrêmement polluants. Ces poussières possèdent des propriétés de persistance et de bio accumulation, ce qui leur permet de se déplacer sur de très longues distances et de se déposer loin des lieux d'émission.

I.12 Conclusion

La gestion des déchets abonde de solutions qui permettent de leur donner une nouvelle vie et ce, à travers la valorisation matière ou la valorisation énergétique.

La valorisation énergétique des déchets ménagers repose sur une connaissance précise des paramètres liés à leur combustion, qui conditionne le choix des équipements de l'incinérateur.

Le chapitre suivant s'intéressera donc à l'analyse de la combustion des déchets ménagers et au choix des équipements relatifs à ce type de combustible.

Chapitre II :

Combustion des déchets ménagers

II.1 Introduction

Le principe de base de la combustion est de "mélanger" des matières combustibles (dans le cas présent, les déchets) avec l'oxygène de l'air et d'accroître leur température pour atteindre leur point d'inflammation, il en résulte une réaction exothermique dans le four. La plus grande difficulté du procédé, liée à la composition hétérogène des déchets ménagers, est de trouver le bon mélange combustible-air. L'enjeu est, entre autres, notamment d'obtenir une combustion qui aboutira au minimum d'imbrûlés et générera une pollution atmosphérique minimale.

A travers ce chapitre, nous retiendrons le choix des équipements où a lieu la combustion. Ensuite nous caractériserons le combustible (le déchet) et les fumées dégagées.

II.2 Chaudière et chambre d'incinération

Plusieurs formes de technologies peuvent être mises en œuvre. Elles diffèrent selon le type de four ou de chaudière utilisé. Le choix d'un four repose sur le rendement thermique recherché mais aussi sur la qualité des rejets atmosphériques. En effet, les rejets sont d'autant plus faibles que la combustion est bonne. Moins d'équipements périphériques sont alors requis pour le traitement des effluents. Le choix repose également sur d'autres éléments comme la capacité annuelle de l'installation, la quantité et la qualité des cendres et des mâchefers produits. On distingue ainsi :

- **Les fours à grille** : les déchets avancent dans le foyer du four sur une grille mobile au travers de laquelle circule l'air nécessaire à la combustion. C'est le four le plus répandu ;

- **Les fours à lits fluidisés** : les déchets sont broyés puis mélangés à un lit de sable. L'air de combustion est insufflé vers le haut à travers le lit mis en mouvement et porté à température élevée. Ce procédé peut être rotatif ou circulant.

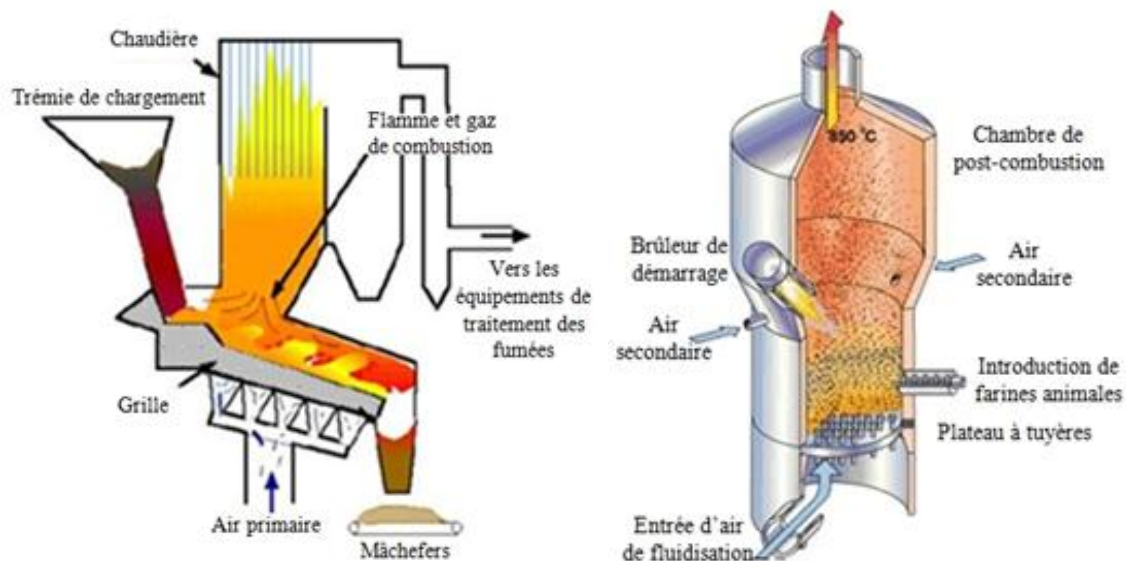


Figure II-1 Schéma des fours

a) Schéma du four à grille b) schéma du four à lit fluidisé

-**Les fours tournants** : les déchets entrent dans un four cylindrique incliné dans lequel circule de l'air. Le four tourne et permet ainsi la progression des déchets dans le foyer, dans le même sens ou à contre-courant de l'air de combustion ;

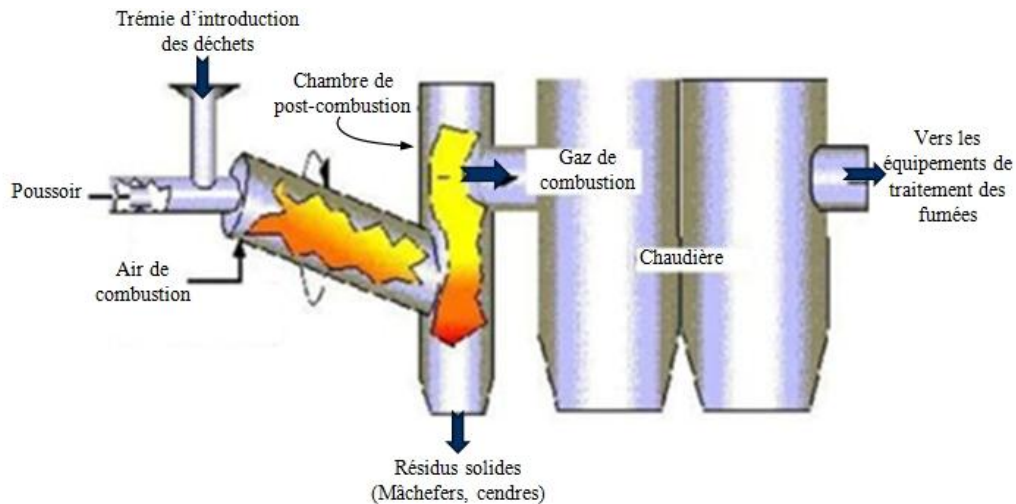


Figure II-2 Schéma du four tournant

Dans le cadre de la présente étude, notre choix se portera sur les fours à grille, car plus adaptés à la combustion des déchets ménagers.

II.3 Grille d'incinération [15]

La grille d'incinération accomplit les fonctions suivantes :

- Transport des matériaux qui seront incinérés dans le four
- Chauffe et desserrage des matériaux à être incinérés.
- Positionnement de la zone d'incinération principale dans la chambre d'incinération, si possible en combinaison avec les mesures de contrôle de performance du four.

L'objectif de la grille d'incinération est de réaliser une bonne distribution de l'air d'incinération dans le four, selon les besoins de la combustion. Un souffleur d'air primaire pousse l'air d'incinération au travers de petites ouvertures grillagées en couche dans les couches du combustible. Plus d'air est généralement ajouté au-dessus du lit de déchets pour une combustion complète. Il est courant pour certains matériaux fins (parfois appelés *déchets de triage ou de tamisage*), de tomber à travers les grilles. Ce matériau est recyclé dans l'extracteur de mâchefers. Parfois il est recyclé séparément et peut être recyclé vers les grilles pour répéter l'incinération.

Quand les résidus du tamisage sont recyclés vers la trémie, il faut faire attention à ce que les déchets dans la trémie ne prennent pas feu. Normalement, le temps de résidence des déchets sur les grilles n'excède pas 60 minutes.

On peut distinguer différents systèmes de grilles selon la manière dont les déchets sont transportés à travers les différentes zones dans la chambre de combustion. Chacun doit répondre à des exigences concernant l'alimentation en air primaire, la vitesse de transport et le positionnement, ainsi que le mélange des déchets. D'autres dispositifs peuvent inclure des contrôles supplémentaires, ou une construction robuste pour supporter les conditions difficiles dans la chambre de combustion.

On cite :

-La grille basculante :Dans ce type de configuration, les sections de grilles sont placées en travers de la largeur du four. Des rangées intermédiaires pivotent mécaniquement ou basculent pour produire un mouvement vertical de haut en bas, avançant et agitant les déchets.

-La grille d'alimentation Avant :Dans ce type de configuration, les grilles, généralement inclinées d'une dizaine de degrés vers le bas, sont constituées d'une alternance de rangées de barreaux fixes et mobiles, où le mouvement alternatif des barreaux mobiles pousse vers l'avant la masse de déchets.

-La grille d'alimentation contraire :Dans ce type de configuration, les rangées de barreaux mobiles, sont alternées avec des rangées de barreaux fixes, poussent vers l'amont les déchets, sont davantage inclinées. Dans cette technologie, la combinaison de cette forte inclinaison qui favorise le mouvement par gravité des déchets vers l'aval, et du mouvement des barreaux qui provoque leur remontée est le facteur qui crée le brassage nécessaire des déchets.

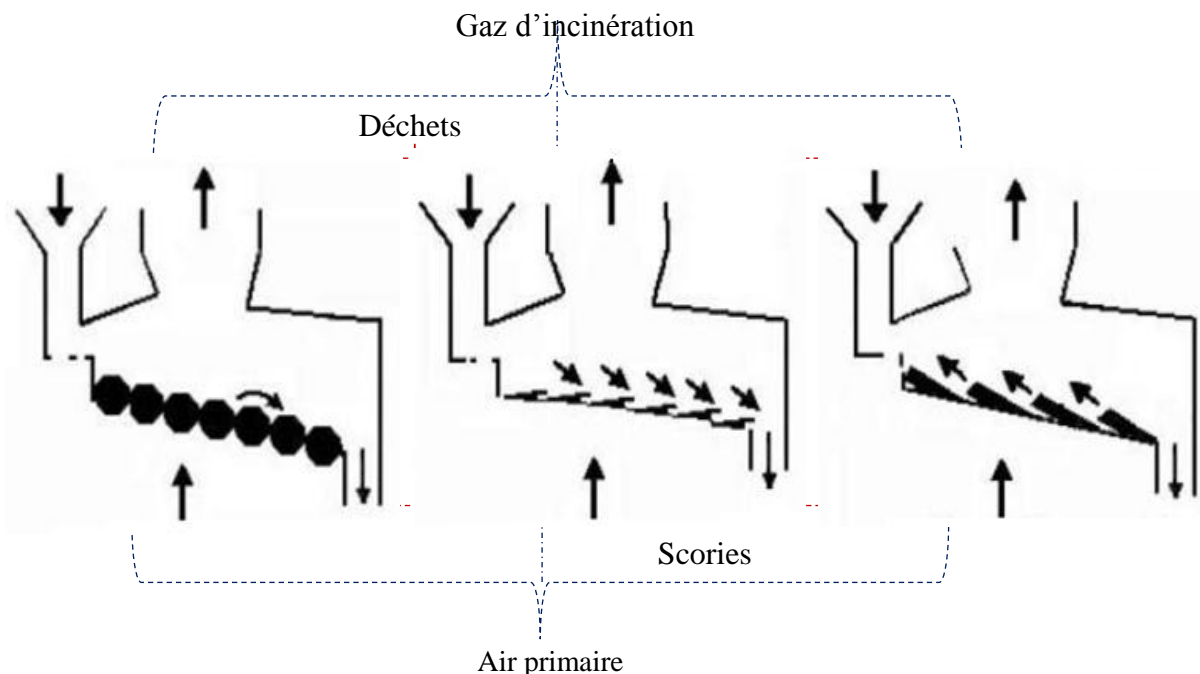


Figure II -3 Grilles d'incinérateurs : (a) Grille basculante (b) Grille d'alimentation avant (c) Grille d'alimentation contraire

II.4 Description détaillée de la combustion sur grille

La technique de combustion sur grille est la plus adaptée à la valorisation énergétique des déchets ménagers. Afin de pallier aux difficultés de combustion inhérentes aux propriétés des déchets, le principe commun à tous les types de grille est de favoriser un brassage aussi poussé que possible des déchets tout en leur assurant un temps de séjour suffisamment long dans le foyer (de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes).

Les grilles mobiles sont adaptées à des combustibles à l'humidité et à la granulométrie variables, et aux moyennes et grosses puissances. C'est ce type de foyer qui est le plus souvent choisi pour les chaudières collectives ou industrielles. Ce sont des alignements successifs de barreaux, alternativement mobiles et fixes. Leur mise en mouvement permet aux combustibles humides de cheminer et de sécher préalablement à la combustion proprement dite

Grilles refroidies : La plupart des grilles sont refroidies, le plus souvent avec de l'air. Dans certains cas, un media de refroidissement liquide (généralement de l'eau) passe à l'intérieur de la grille. Le flux du media de refroidissement va des zones les plus froides pour aller progressivement vers les plus chaudes afin de maximiser le transfert de chaleur. La chaleur absorbée par le media de refroidissement peut être réutilisée dans le processus ou dans une alimentation externe.

Le refroidissement à eau est surtout pratiquée quand le pouvoir calorifique des déchets est plus élevée (>12 -15 MJ/kg). La conception du système de refroidissement à eau est légèrement plus complexe que celle des systèmes de refroidissement à air. Le recours au refroidissement à eau permet de réguler la température du métal de la grille et la température de combustion locale plus indépendamment de l'alimentation en air primaire (qui a lieu normalement entre les barres de la grille). Ceci peut alors permettre à la température et à l'alimentation en air d'être optimisées pour répondre à des besoins spécifiques de combustion et ainsi améliorer la performance de la combustion. Un plus grand contrôle de la température de grille peut permettre l'incinération de déchets à pouvoirs calorifiques plus élevés tout en évitant le surplus de problèmes de fonctionnement et d'entretien qu'une telle incinération occasionne habituellement

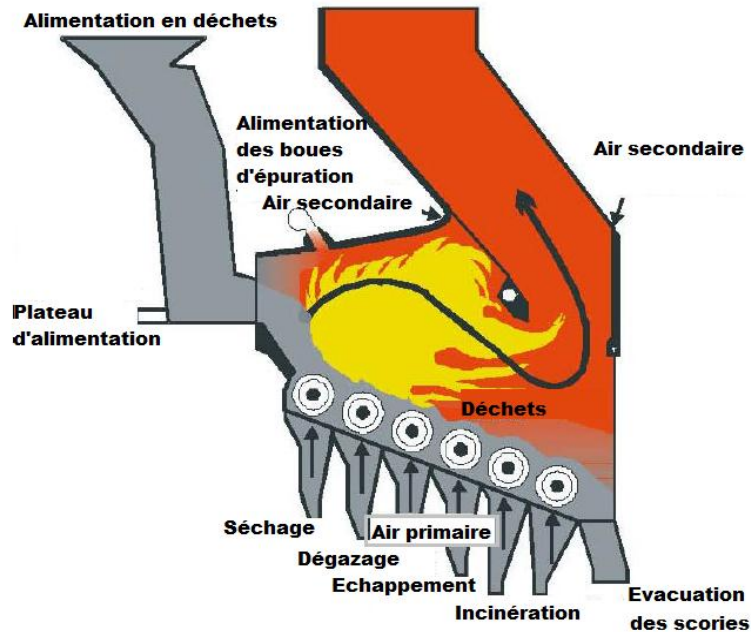


Figure II-4 Schéma d'une chambre d'incinération

La combustion se réalise au-dessus de la grille dans la chambre d'incinération. Dans son ensemble, la chambre d'incinération comporte typiquement une grille située en dessous, des murs refroidis et non refroidis sur les côtés du four, et un réchauffeur de plafond ou de surface de la chaudière au-dessus. Comme les déchets urbains ont généralement une teneur en matière volatile élevée, la phase de dégazage laisse seulement une petite partie de l'incinération se produire sur ou près de la grille. Les exigences suivantes influencent la conception de la chambre de combustion :

- Forme et taille de la grille d'incinération – la taille de la grille détermine la taille de la section croisée de la chambre d'incinération

- Tourbillon et homogénéité du flux des gaz brûlés – le mélange complet des gaz brûlés est essentiel pour une bonne incinération de ces derniers.

- Un temps de résidence suffisant pour les gaz brûlés dans le four chaud – un temps de réaction suffisant à de hautes températures doit être assuré pour une incinération complète.

- Refroidissement partiel des gaz brûlés – pour éviter la fusion des cendres volantes chaudes dans la chaudière, la température des gaz brûlés ne doit pas dépasser une limite supérieure à la sortie de la chambre d'incinération.

II.4.1 Chambre de combustion :

La conception détaillée d'une chambre de combustion est généralement liée au type de grille. Elle demande certains compromis, car les exigences du processus changent avec les caractéristiques du combustible. Chaque fournisseur a sa propre combinaison de grille et de chambre de combustion, dont la conception précise est basée sur la performance individuelle de leur système et de leurs expériences spécifiques. Les opérateurs européens des déchets

solides urbains n'ont trouvé aucun avantage ou inconvénient pour les différentes conceptions de la chambre de combustion [15].

Dans les anciennes chaudières, les tubes écrans étaient espacés et posés sur une paroi intérieure revêtue d'une couche de matériau réfractaire (Figure II-0-1-a). Entre le mur réfractaire et les tubes d'eau, il est difficile d'assurer l'étanchéité par rapport aux gaz de combustion, qui pourraient alors s'échapper dans l'atmosphère en provoquant au passage une corrosion aux interfaces de l'enveloppe de la chaudière. Pour réduire ces fuites inévitables, on a eu recours à l'utilisation combinée d'un ventilateur de soufflage et d'un ventilateur de tirage pour maintenir partout la pression des gaz proche de la pression atmosphérique. En collant les tubes les uns aux autres pour couvrir entièrement la paroi du four, on peut faire l'économie de la couche de réfractaire tout en réduisant davantage les fuites de gaz vers l'atmosphère (Figure II-0-2-b). Sauf que cette configuration maintient le risque potentiel que les gaz de combustion puissent passer à travers la paroi de séparation vers la zone de convection, à cause des jeux que laissent les déformations thermiques des tubes en cours de fonctionnement. Ces courts-circuits de gaz encore très chauds, où les processus de combustion n'ont pas été menés à bout conduisent à :

- des taux d'imbrûlés plus élevés dans les fumées (notamment le CO) ;
- une température des fumées plus élevée à la sortie de l'évaporateur ;
- une température de vapeur plus basse à la sortie du surchauffeur.

Tout ceci ayant bien sûr pour conséquence une baisse de rendement du procédé. Ces problèmes ont trouvé leur solution de nos jours en l'utilisation de parois à membrane, où les tubes portent des ailettes rectangulaires qui sont soudées entre elles bout à bout (Figure II-0-3-c), pour former une membrane métallique tapissant de l'intérieur toute l'enceinte du four et garantissant son étanchéité à toute épreuve. Dans une telle configuration, on évite les fuites, les courts-circuits et on peut réunir les conditions d'une combustion complète, pourvu que le volume du four soit suffisant pour que les gaz y séjournent le temps nécessaire à l'accomplissement de la combustion [16].

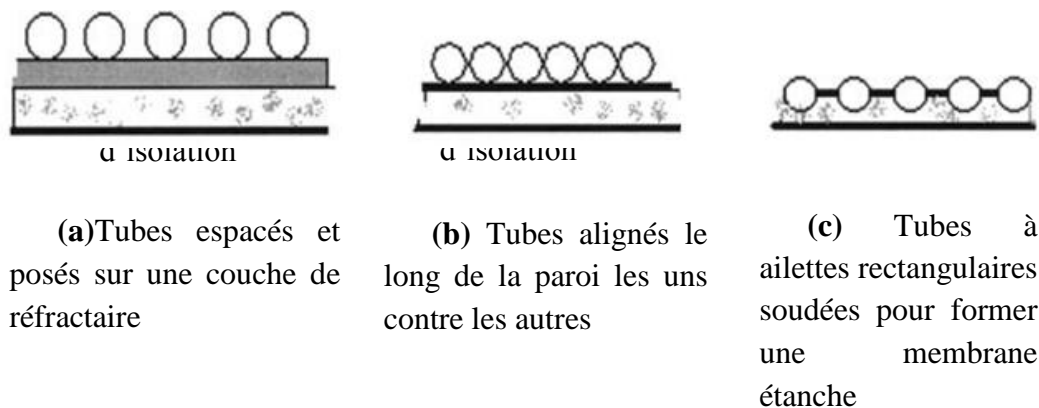


Figure II-5 Schéma des différents types d'écrans d'eau

En général, on peut distinguer trois conceptions différentes. La nomenclature provient de la direction du flux des gaz brûlés par rapport au flux des déchets : courant unidirectionnel; contre-courant et courant moyen.

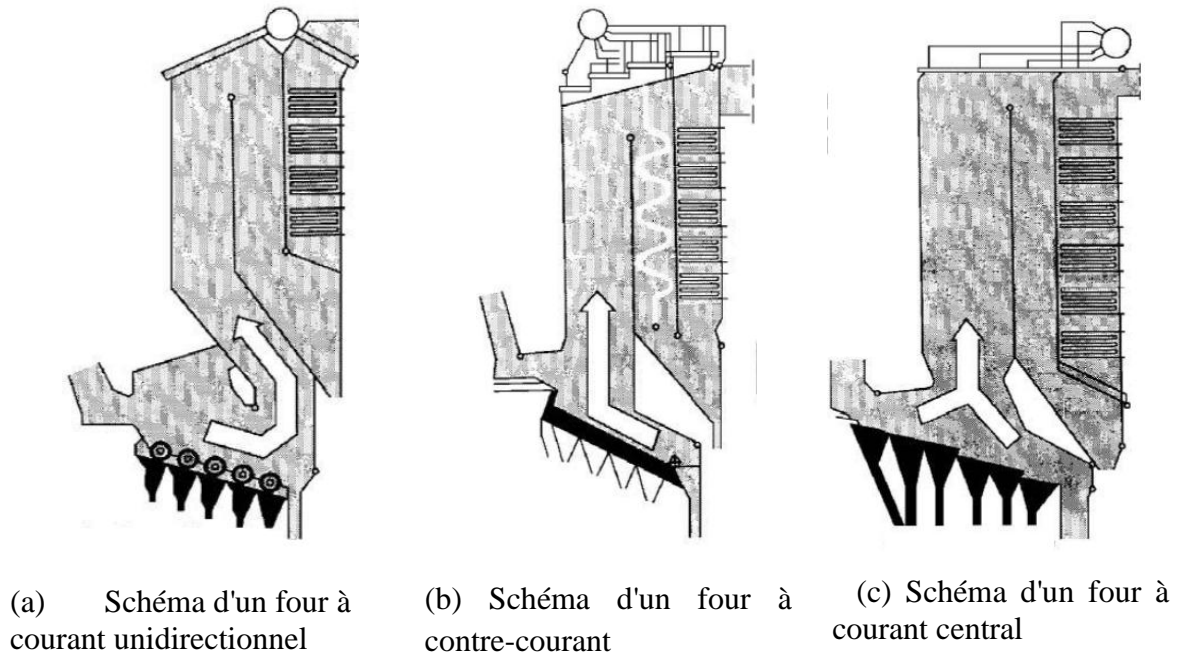


Figure II-6 Différents types de circulation à travers la grille d'un four

Four à courant unidirectionnel (on dit également four à flux parallèle) : Dans un dispositif de combustion unidirectionnel, l'air de combustion primaire et les déchets sont guidés dans un flux unidirectionnel à travers la chambre de combustion. La production de gaz brûlés est située en fin de grille. Seule une quantité comparativement faible d'énergie est échangée entre les gaz de combustion et les déchets sur la grille. L'avantage des concepts à courant unidirectionnel est que le gaz brûlé a le temps de résidence le plus long dans la zone d'allumage et qu'il doit passer à travers la température maximum. Pour faciliter l'allumage, l'air primaire doit être préchauffé.

Four à contre-flux ou contre-courant: Dans ce cas, l'air de combustion primaire et les déchets sont guidés dans un dispositif de flux à contre-courant au travers de la chambre de combustion et la production de gaz brûlés est située à l'extrémité avant de la grille. Les gaz brûlés chauds facilitent le séchage et l'allumage des déchets. Une attention particulière doit être apportée à la conception pour éviter le passage de flux de gaz non brûlés. En règle générale, les concepts à contre-courant exigent des apports d'air secondaire et supérieur plus importants.

Four à courant moyen et central: La composition des déchets solides urbains varie considérablement et le concept de courant moyen est un compromis pour une large gamme de déchets. Un bon mélange de tous les courants partiels de gaz brûlés doit être favorisé par le dessin des contours de la zone de mélange et/ou la manière dont se font les injections d'air secondaire. Dans ce cas, la production de gaz brûlés est située au centre de la grille.

II.4.2 Zone de convection

Dans la zone où les transferts de chaleur entre le fluide caloporteur (l'eau liquide ou la vapeur d'eau) et les fumées sont largement prédominés par les phénomènes de convection, les écoulements de ces fluides ont lieu globalement en contre-courant. De l'entrée des fumées dans cette zone jusqu'à la sortie, elles traversent respectivement les échangeurs suivants :

Le surchauffeur : C'est un échangeur de chaleur constitué d'une série de nappes tubulaires, il est alimenté par la vapeur saturée issue du ballon supérieur de la chaudière, il surchauffe cette dernière jusqu'à la valeur désirée de la température à la sortie. La vapeur surchauffée ainsi produite est en générale destinée à une turbine à travers laquelle elle va se détendre pour produire de l'énergie mécanique, qui sera à son tour convertie en énergie électrique dans un alternateur.

L'évaporateur : C'est un échangeur de chaleur constitué par des faisceaux de tubes reliant deux collecteurs appelés "ballons de chaudière" :

- un ballon supérieur recueillant la vapeur d'eau au fur et à mesure qu'elle se forme et qu'elle remonte grâce à sa grande différence de densité par rapport à l'eau, différence de densité qui génère des courants de convection naturels, d'autant plus importants que la pression est basse, dans les tubes ascendants ;

- un ballon inférieur collectant l'eau liquide amenée par les tubes descendants.

Le ballon supérieur doit être conçu de façon à contenir constamment de l'eau liquide en quantité suffisante dans sa moitié inférieure afin d'éviter les problèmes de surchauffe des tubes ascendants dans leurs parties qui les relient au ballon.

L'économiseur : C'est un échangeur de chaleur constitué de faisceaux de tubes raccordés l'un à l'autre à chaque extrémité par des coudes, où l'eau d'alimentation est chauffée par les fumées jusqu'à saturation. Il est situé à la sortie de la zone de convection en suivant le parcours des fumées.

En plus de ces trois échangeurs principaux, nous avons, dans cette étude, prolongé la zone de convection par un préchauffeur d'air qui, en alimentant le four avec un air plus chaud va favoriser le pré-séchage des déchets, et un préchauffeur d'eau qui va aider à amener la température de l'eau d'alimentation à une valeur suffisamment élevée pour éviter le problème de condensation acide et donc de corrosion dans l'économiseur. De plus, ces deux échangeurs en nous permettant de puiser au maximum dans l'énergie des fumées, vont améliorer le rendement de la chaudière.

II.5 Détermination de la composition du déchet

Le gisement d'ordures ménagères pouvant être admis en décharge en tant que "*déchets ménagers*" a une composition assez diverse et varie en fonction de nombreux facteurs:

Le type d'habitat (résidentiel ou urbain), *la saison* et *les jours de la semaine*, *la géographie* (à l'échelle d'une région et d'un pays), *la réglementation* locale et/ou nationale par rapport aux types de déchets admis (déchets ménagers, boues, déchets industriels banals), *les méthodes de gestion des déchets* (collectes sélectives, tri préalable des déchets ménagers spéciaux, des déchets verts, admission de déchets industriels, etc.).

La composition des déchets ménagers évolue également en fonction du temps : en quelques années, la composition des déchets a évolué (de plus en plus de déchets d'emballages par exemple, modification des produits eux-mêmes : piles, emballages, ordinateurs). Les décharges actuelles ne reçoivent plus les mêmes déchets qu'il y a 10 ou 20 ans. Parallèlement à la composition, certaines caractéristiques comme l'humidité initiale et la distribution granulométrique des déchets vont déterminer : le comportement hydraulique des déchets dans la décharge : capacité d'emmagasinement de l'eau (rôle des matériaux à base de papier), écoulement de l'eau, leur biodégradabilité : influence sur la production et la composition du biogaz, la composition des lixiviats, la cinétique et l'amplitude des tassements, la stabilité mécanique des déchets. En dépit de cette variabilité des apports, le contenu organique biodégradable des déchets placés en décharge conserverait des propriétés assez constantes.

II.6 Composition des déchets de cette étude

Dans la présente étude, de nous allons utiliser l'analyse élémentaire des déchets ménagers de la régie inter municipale de la ville de Montréal, 1988. Elle est donnée dans le tableau ci-dessous [17]:

Tableau II-1 Analyse élémentaire des OM de l'étude par type

	%	Composition massique élémentaire sur base sèche (%)						(H ₂ O) _i (%)
	Z _i	C _i	H _i	O _i	N _i	S _i	(Cendres) _i	
Organiques								
<i>Restes de nourriture</i>	18,08	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5	70
<i>Papier + Carton</i>	31,89	43,75	5,95	44,3	0,3	0,2	5,5	5,5
<i>Plastiques</i>	7,3	60	7,2	22,8			10	2
<i>Textiles</i>	3,56	55	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5	10
<i>Caoutchouc</i>	0,62	78	10		2		10	2
<i>Cuir</i>	0,62	60	8	11,6	10	0,4	10	10
<i>Résidus de jardin</i>	9,17	47,8	6	38	3,4	0,3	4,5	60
<i>Bois</i>	6,33	49,5	6	42,7	0,2	0,1	1,5	20
Inorganiques								
<i>Verre</i>	4,35	0,5	0,1	0,4	0,1		98,9	2
<i>Matière métallique</i>	4,77	4,5	0,6	4,3	0,1		90,5	3
<i>Terre, poussière</i>	13,31	26,3	3	2	0,5	0,2	68	8

A partir du tableau ci-dessus, On procède au calcul de la composition massique élémentaire de notre combustible comme suit :

$$[C] = \sum_i Z_i \cdot C_i$$

$$[H] = \sum_i Z_i \cdot H_i$$

.....

$$[H_2O] = \sum_i Z_i \cdot H_2O_i$$

où les Z_i ; C_i ... apparaissant dans le tableau II.1 ci-dessus en %, sont à exprimés en fractions massiques, et les $[C]$; $[H]$;... représentent les fractions massiques des espèces correspondantes, autres que l'eau, dans notre combustible sur une base sèche ; tandis que $[H_2O]$ est la fraction massique de l'eau dans le brut. Les résultats de ces calculs apparaissent à la deuxième ligne du tableau II.2 ci-dessous. La troisième ligne donne les fractions massiques ramenées à un kg de déchet brut, on obtient cette fraction sur brut pour chaque élément simplement en multipliant sa fraction massique sur sec par $(1 - [H_2O])$

Tableau II-2 Composition massique du déchet sur matière sèche et sur brut

	[C]	[H]	[O]	[N]	[S]	[Cendres]	[H ₂ O]
Combustible sec	0,4108	0,0529	0,3045	0,0120	0,0020	0,2178	0,2305
Brut	0,3161	0,0407	0,2343	0,0093	0,0016	0,1676	0,2305

II.7 Combustion des déchets

Dans la plupart des réactions de combustion, le comburant n'est pas de l'oxygène pur mais de l'air, généralement directement pris dans l'atmosphère et supposé avoir une composition constante. Nous considérons dans les calculs que l'air est constitué d'Oxygène et d'Azote dont les rapports molaires pris en compte lors de la combustion du déchet sont de 0,21 et 0,79 respectivement.

La combustion des déchets ménagers est supposée dans le cadre de cette étude être accompagnée par les deux hypothèses principales suivantes :

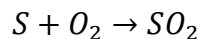
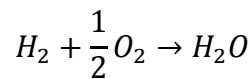
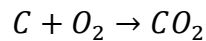
Elle se fait de manière adiabatique.

Les cendres précipitent au fond du four.

En considérant la combustion complète, on retrouvera dans les fumées les produits de la combustion stœchiométriques :CO₂,SO₂,H₂O,N₂ et de l'oxygène non utilisé.

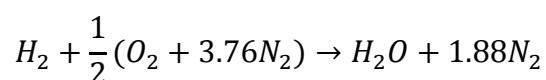
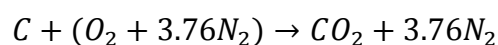
II.7.1 Les réactions de la combustion

Les principales réactions chimiques d'une combustion complète concernant les éléments combustibles du déchet sont :

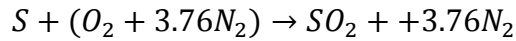


II.7.2 L'air théorique

C'est la quantité minimale d'air nécessaire à la combustion complète du déchet. Pour la déterminer, il suffit de calculer les besoins en oxygène pour la combustion complète du carbone, de l'hydrogène et du soufre contenus dans le déchet, puis de sommer ces besoins et de soustraire de la somme ainsi obtenue l'oxygène qui entre dans la composition du combustible. La quantité d'air théorique se calcule alors en tenant compte du fait que chaque mole d'oxygène est associée à 3.76 mole d'azote dans l'air standard. Les réactions ci-dessus peuvent être réécrites en considérant les combustions dans l'air comme suit :



Combustion des déchets ménagers



Quantité d'air nécessaire à la combustion du carbone : D'après la réaction du carbone ci-dessus, on peut noter qu'une kmole de carbone qui correspond à une masse de 12 kg, nécessite pour sa combustion complète une kmole d'O₂ qui correspond à une masse de 32 kg. En notant [C] la fraction massique du carbone dans le combustible, la quantité d'oxygène nécessaire pour la combustion du carbone sera :

$$[O]_C = \frac{32}{12}[C]$$

et la quantité d'air nécessaire à la combustion du carbone :

$$[A]_C = \frac{32}{12}[C] \cdot \frac{32 + 3.76 \cdot 28}{32} = 11.44[C]$$

où [C] est exprimé en kg de carbone/kg de déchet brut et [A]_C en kg d'air/kg de déchet brut.

Quantités d'air nécessaires à la combustion de l'hydrogène et du soufre : En notant [H] et [S] les teneurs du combustible en hydrogène et en soufre respectivement, les quantités d'air [A]_H nécessaire à la combustion de l'hydrogène et [A]_S nécessaire à la combustion du soufre, s'obtiennent par la même procédure que pour le carbone :

$$[A]_H = \frac{16}{2}[H] \cdot \frac{32 + 3.76 \cdot 28}{32} = 34.32[H]$$

$$[A]_S = \frac{32}{32}[S] \cdot \frac{32 + 3.76 \cdot 28}{32} = 4.29[S]$$

Quantité d'air correspondant à l'oxygène présent dans le combustible : Cette quantité doit être déduite de celle qui est nécessaire pour la combustion des éléments C, H et S :

$$[A]_O = [O] \cdot \frac{32 + 3.76 \cdot 28}{32} = 4.29[O]$$

Finalement, l'air théorique (A_t), exprimé en kilogramme d'air par kilogramme de combustible, se calcule comme suit :

$$A_t = [A]_C + [A]_H + [A]_S - [A]_O = 11.44[C] + 34.32[H] + 4.29([S] - [O])$$

où [C], [H], [S] et [O] sont les fractions massiques de carbone, d'hydrogène, de soufre et d'oxygène dans le combustible brut. Les résultats du calcul pour notre déchet dont la composition a été donnée au tableau II.2 sont donnés à la dernière colonne du tableau II.3 ci-après.

Tableau II-3 Air théorique pour la combustion du déchet brut

Elément →		[C]	[H]	[S]	[O]	A _t
Unité		$\frac{kg C}{kg déchet}$	$\frac{kg H}{kg déchet}$	$\frac{kg S}{kg déchet}$	$\frac{kg O}{kg déchet}$	$\frac{kg air}{kg déchet}$
Déchet	Fraction massique →	0,3161	0,0407	0,0016	0,2343	4.0145

II.7.3 Les pouvoirs calorifiques du combustible

Dans le cas d'un combustible solide dont la composition élémentaire est connue, les pouvoirs calorifiques peuvent être calculés à l'aide des formules suivantes [(16)]:

$$PCS = 14\,500[C] + 62\,000 \left([H] - \frac{[O]}{8} \right) + 4\,000[S]$$

$$PCI = PCS - 9\,720[H] - 1\,110[H_2O]$$

Avec :

- [C], [H], [O], [S] et [H₂O]: fractions massiques de carbone, hydrogène, oxygène, soufre et eau respectivement dans le combustible.

- PCS et PCI: pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur respectivement, exprimés dans les expressions ci-dessus en (Btu/lb)

Tableau II-4 Pouvoirs calorifiques du déchet brut

Unité	PCS		PCI	
	$\frac{Btu}{lb}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{Btu}{lb}$	$\frac{kJ}{kg}$
Déchet brut	5297,15	12321,17	4645,70	10805,91

II.7.4 L'excès d'air

C'est la quantité d'air en plus de celle nécessaire à la combustion complète du combustible. L'excès d'air a pour but :

- d'assurer une combustion complète
- de limiter les imbrulés

- de limiter la température des fumées

Typiquement, lors de la combustion des déchets, on utilise des excès d'air de 50 à 80 %.

L'air destiné à la combustion est distribué en deux temps :

Un air primaire (air de grille), qui alimente le feu par dessous la grille ajourée. Les cendres, présentes sur ou sous la grille, ne doivent pas obstruer cette circulation d'air. Cet air primaire passant par la grille, généralement préchauffé, joue un rôle primordial dans la phase de séchage du déchet et du dégagement des gaz combustibles.

Un air secondaire, qui arrive par le haut, il est très utile pour permettre aux résidus et gaz combustibles de continuer à brûler au-dessus du foyer.

II.7.5 Composition des fumées issues d'une combustion complète du déchet

En considérant que toutes les cendres se déposeront au fond du four, les fumées résultant d'une combustion complète comprendront les composants suivants : CO_2 , H_2O , SO_2 et N_2 , en plus du O_2 si la combustion a lieu en présence d'un excès d'air.

D'après la réaction du carbone ci-dessus, on peut noter qu'une kmole de carbone qui correspond à une masse de 12 kg, forme lors d'une combustion complète une kmole de CO_2 qui correspond à une masse de 44 kg. En notant $[\text{CO}_2]$ la masse du dioxyde de carbone formé qui correspond à la combustion de 1 kg de combustible brut, on aura :

$$[\text{CO}_2] = \frac{44}{12} [C]$$

En procédant de même avec le soufre, la masse de SO_2 issue de la combustion complète de 1 kg de déchet brut sera:

$$[\text{SO}_2] = \frac{64}{32} [S] = 2[S]$$

En ce qui concerne l'eau, il faut ajouter à la masse qui se forme à partir de la combustion de l'hydrogène, celle de l'eau qui entre dans la composition brut du combustible ; on aura ainsi dans les fumées pour chaque kg de brut ayant subi une combustion complète :

$$[\text{H}_2\text{O}]_f = \frac{18}{2} [H] + [\text{H}_2\text{O}] = 9[H] + [\text{H}_2\text{O}]$$

Pour obtenir la masse d'azote présente dans les fumées résultant de la combustion complète de 1 kg de déchet brut, il faut additionner celle qui entre dans la combustion du combustible et celle apportée par l'air, on aura ainsi :

Combustion des déchets ménagers

$$[N_2] = [N] + \frac{3.76 \cdot 28}{32 + 3.76 \cdot 28} (\alpha A_t) = [N] + 0.7669(\alpha A_t)$$

Où α représente le rapport de la quantité d'air utilisé pour la combustion sur la quantité d'air théorique. Dans le cas d'une combustion réalisée avec l'air théorique, on a : $\alpha = 1$.

La masse d'oxygène dans les fumées résultant d'une combustion de 1 kg de déchet brut avec excès d'air ($\alpha > 1$) sera :

$$[O_2] = \frac{32}{32 + 3.76 \cdot 28} (\alpha - 1)A_t = 0.2331(\alpha - 1)A_t$$

Le pouvoir fumigène du combustible m_f , exprimé en kg de fumées par kg de déchet brut sera donc ;

$$\begin{aligned} m_f &= [CO_2] + [H_2O]_f + [SO_2] + [N_2] + [O_2] \\ &= \frac{44}{12}[C] + 9[H] + [H_2O] + 2[S] + [N] + 0.7669(\alpha A_t) + 0.2331(\alpha - 1)A_t \end{aligned}$$

La composition massique des fumées s'obtient par le calcul des fractions massiques :

$$x_i = \frac{[CO_2]}{m_f} ; \frac{[H_2O]_f}{m_f} ; \frac{[SO_2]}{m_f} ; \frac{[N_2]}{m_f} ; \frac{[O_2]}{m_f}$$

Et leur composition molaire, par le calcul des fractions molaires :

$$\begin{aligned} y_i &= \frac{n_i}{n_f} \\ n_i &= \frac{[CO_2]}{M_{CO_2}} ; \frac{[H_2O]_f}{M_{H_2O}} ; \frac{[SO_2]}{M_{SO_2}} ; \frac{[N_2]}{M_{N_2}} ; \frac{[O_2]}{M_{O_2}} \\ n_f &= \sum_i n_i \end{aligned}$$

La masse molaire apparente des fumées est obtenue en faisant la somme des produits de la fraction molaire par la masse molaire de chacun des constituants :

$$M_f = \sum_i y_i \cdot M_i$$

La composition des fumées est donnée en fonction du rapport d'air théorique (α) au tableau II.5 ci-dessous.

Combustion des déchets ménagers

Tableau II-5 Composition des fumées issues de la combustion du déchet brut pour différentes valeurs du rapport d'air théorique α

Rapport d'air ↓	Constituant i →	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂	
	M _i	44	18	64	28	32	
$\alpha = 1$	m _i (kg/kg déchet)	1,1590	0,5968	0,0031	3,0880	0	4,8469
	x _i	0,2391	0,1231	0,0006	0,6371	0	1,0000
	n _i (kmol/kgdéchet)	0,0263	0,0332	0,00005	0,1103	0	0,1698
	y _i	0,1551	0,1952	0,0003	0,6494	0	1,0000
	y _i M _i	6,8245	3,5140	0,0185	18,1828	0	M _f =28,5398
$\alpha = 1.5$	m _i (kg/kg déchet)	1,1590	0,5968	0,0031	4,6273	0,4679	6,8542
	x _i	0,1691	0,0871	0,0005	0,6751	0,0683	1,0000
	n _i (kmol/kgdéchet)	0,0263	0,0332	0,00005	0,1653	0,0146	0,2394
	y _i	0,1100	0,1385	0,0002	0,6902	0,0611	1,0000
	y _i M _i	4,8407	2,4925	0,0131	19,3266	1,9542	M _f =28,6272
$\alpha = 1.6$	m _i (kg/kg déchet)	1,1590	0,5968	0,0031	4,9352	0,5615	7,2556
	x _i	0,1597	0,0823	0,0004	0,6802	0,0774	1,0000
	n _i (kmol/kgdéchet)	0,0263	0,0332	0,00005	0,1763	0,0175	0,2533
	y _i	0,1040	0,1309	0,0002	0,6957	0,0693	1,0000
	y _i M _i	4,5748	2,3556	0,0124	19,4799	2,2162	M _f =28,6389
$\alpha = 1.7$	m _i (kg/kg déchet)	1,1590	0,5968	0,0031	5,2431	0,6550	7,6571
	x _i	0,1514	0,0779	0,0004	0,6847	0,0855	1,0000
	n _i (kmol/kgdéchet)	0,0263	0,0332	0,00005	0,1873	0,0205	0,2673
	y _i	0,0986	0,1241	0,0002	0,7006	0,0766	1,0000
	y _i M _i	4,3365	2,2329	0,0118	19,6173	2,4509	M _f =28,6494
$\alpha = 2$	m _i (kg/kg déchet)	1,1590	0,5968	0,0031	6,1667	0,9358	8,8614
	x _i	0,1308	0,0673	0,0004	0,6959	0,1056	1,0000
	n _i (kmol/kgdéchet)	0,0263	0,0332	0,00005	0,2202	0,0292	0,3090
	y _i	0,0852	0,1073	0,0002	0,7127	0,0946	1,0000
	y _i M _i	3,7505	1,9312	0,0102	19,9552	3,0281	M _f =28,6752

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons choisi la technologie qui paraît être la plus adaptée au combustible du type « déchet ménager », à savoir, le four à grille mobile. Nous avons également défini la composition élémentaire du combustible, puis calculé ses pouvoirs calorifiques et la composition des fumées issues de combustions en présence de différentes valeurs du rapport d'air théorique. Ces calculs vont maintenant être utilisés au chapitre suivant en vue d'effectuer l'analyse thermique de la chaudière.

Chapitre III : Dimensionnement thermique de la chaudière

III.1 Introduction :

La valorisation énergétique des déchets ménagers permet de produire électricité et chaleur. Dans le cadre de cette étude, les besoins énergétiques du procédé industriel auquel l'incinérateur est lié, sont de l'ordre de 60 t/h de vapeur.

Les besoins énergétiques et le combustible étant définis, nous pouvons à présent nous intéresser au dimensionnement thermique de la chaudière,

III.2 Le Four

III.2.1 Détermination de la température de flamme :

Habituellement, cette température se calcule en considérant une combustion adiabatique lors de laquelle toute l'énergie libérée sera absorbée par les gaz issus de la combustion, qui verront ainsi leur température atteindre sa plus grande valeur possible.

Dans ce cas, la température se calcule en posant que l'enthalpie des produits est égale à celle des réactifs, d'après le bilan d'énergie, un tel calcul exigerait la connaissance des enthalpies de formation de toutes les espèces en présence. Or, dans notre cas, nous ne disposons que de la composition élémentaire du combustible. Nous ne pouvons donc pas savoir les enthalpies de formation des espèces chimiques constituant réellement le combustible. Pour des cas comme la notre, où le combustible est défini par analyse ultime, des formules empiriques sont proposées dans la littérature, formules qui tiennent compte également du fait que la combustion dans le four n'est pas totalement adiabatique.

Une de ces formules est proposée dans l'ouvrage de V.Ganapathy, intitulé "Industrial Boilers and HeatRecoverySteamGenerators" cité en référence (16)

$$T_c = \frac{(PCI) + (A\alpha)(PCS) \cdot C_{Pa}(T_a - 80) \cdot 10^{-6}}{\left(1 - \frac{\%Cendres}{100} + (A\alpha)(PCS) \cdot 10^{-6}\right)C_{Pg}} \quad (III.1)$$

(PCI) et (PCS) : Pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur en $\left(\frac{Btu}{lb}\right)$

A : Quantité d'air théorique nécessaire pour la libération d'une énergie de $10^6 Btu$ $PCSA = \frac{A_t \cdot 10^6}{PCS}$ avec A_t : quantité d'air théorique définie précédemment au chapitre II

α : Rapport d'air théorique

$$A = 757,5$$

T_a et T_c : Températures de l'air de combustion et de la flamme respectivement (en °F)

C_{Pa} et C_{Pg} : Chaleur spécifique de l'air et des gaz de combustion respectivement (en $\frac{Btu}{lb} \cdot ^\circ F$). C_{Pa} est évaluée à la température de l'air à l'entrée du foyer et C_{Pg} à la température T_c

Notons que la valeur de la température de flamme T_c dépend du rapport d'air théorique (α). C'est en fait, en agissant sur la valeur de ce rapport que nous pouvons contrôler cette température pour un combustible donné.

Dans le cas des déchets, cette température doit rester en dessous de la température de ramollissement des cendres qui est de l'ordre de 1000 °C

En effet, les cendres doivent rester tout le temps à l'état solide, si la température dépasse leur point de ramollissement, elles passent à la phase gazeuse et dès que leur température redescend en dessous du point de ramollissement, elles se déposent sous forme de scories, généralement à l'entrée du surchauffeur avec le risque de créer des bouchons dans le parcours des fumées et même de corrosion des surfaces d'échange.

Le rapport d'air théorique (α) sera donc choisi, entre autre de façon à éviter que la température de flamme ne dépasse pas dans notre cas 1000 °C par mesure de conservation.

III.2.2 Détermination de la température des gaz à la sortie du four :

Pour calculer la température qu'auront les gaz de combustion au moment où ils vont quitter le four, nous allons établir le bilan d'énergie au niveau de la zone de rayonnement. Cette zone est modélisée à la figure (III.1) ci-dessous, où la masse des gaz rayonnante vers les parois intérieures de la chambre de combustion tapissées d'écrans d'eau, est représentée en pointillés avec la flamme au fond du four. Cette masse de gaz constitue un volume de contrôle qui reçoit à l'entrée le combustible, modélisé par son débit (\dot{m}_c) et l'énergie qu'il transporte, représentée par son PCI, et l'air qui admis au four avec un débit (\dot{m}_a) et à la température (T_a). A la sortie de notre volume de contrôle, les gaz de combustion quittent le four à la température (T_e) que nous cherchons.

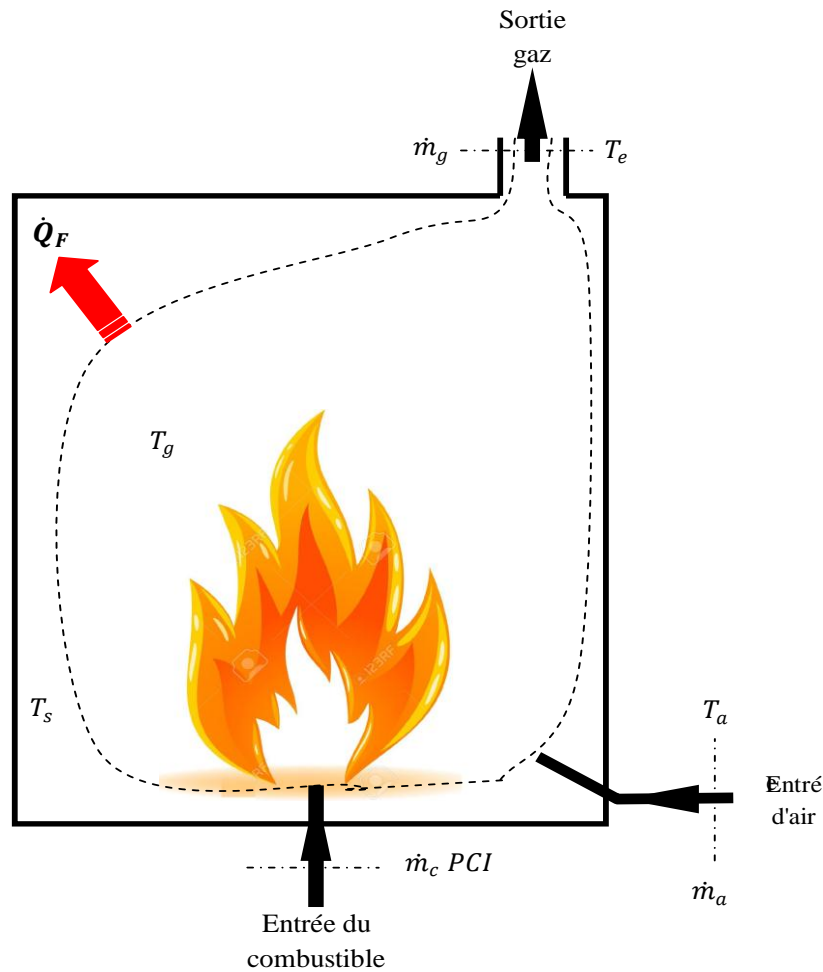


Figure III-1 Schéma de la zone de rayonnement

La chaleur rayonnée par les gaz et absorbée par les écrans est notée (\dot{Q}_F). Le principe de conservation de la masse permet d'écrire :

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_a - \dot{m}_{cendres} \quad (III.2)$$

Puisque nous admettons que la masse des cendres qui accompagne le combustible à l'entrée, se dépose au fond du four.

Le bilan d'énergie pour notre volume de contrôle donne à présent :

$$\dot{Q}_F + \dot{m}_g h_e = \dot{m}_a h_a + \dot{m}_c PCI \quad (III.3)$$

Plus bas, nous allons introduire une expression empirique pour la température (T_g) avec laquelle les gaz rayonnent dans la chambre de combustion. Dans cette expression, les températures sont en [°R]. Nous allons donc travailler le bilan d'énergie ci-dessus dans le système anglo-saxon pour éviter toute confusion. La température sera donc en [°R] et les enthalpies de l'air et des gaz, assimilés à des gaz parfaits, seront calculées par la loi de Joule avec :

Dimensionnement thermique de la chaudière

Comme référence : $h=0$ à $T=0$ °R

On posera donc dans l'expression (III.3) :

$$h_e = C_{P_{gF}} T_e \text{ et } h_a = C_{P_a} T_a$$

Où $C_{P_{gF}}$ et C_{P_a} sont les chaleurs spécifiques à pression constante pour les gaz à T_e et pour l'air à T_a respectivement. Ces chaleurs spécifiques seront exprimées en [Btu/lb.°R].

L'expression (III.3) devient :

$$\dot{Q}_F + \dot{m}_g C_{P_g} T_e = \dot{m}_a C_{P_a} T_a + \dot{m}_c PCI \quad (III.4)$$

En considérant que le rayonnement a lieu majoritairement à partir d'une surface autour de la flamme dont l'air est négligeable devant selon celle de la paroi intérieure de l'enceinte du four, la loi du rayonnement du corps noir nous permet d'écrire :

$$\dot{Q}_F = \sigma A_P \varepsilon_S \varepsilon_g (T_g^4 - T_S^4) \quad (III.5)$$

Avec :

A_P : Surface projetée de l'enceinte du four qui aborde les gaz de combustion avant leur arrivée dans la zone de convection (ft^2)

$\varepsilon_S, \varepsilon_g$: Emissivités de la paroi et des gaz de combustion respectivement.

T_S : Température de la surface des écrans (°R). Cette température ne doit pas dépasser beaucoup celle de l'eau à l'intérieur des écrans qui est de 240°C, étant donné que ces deux températures ne sont séparées que par une résistance à de conduction d'un matériau très bon conducteur, on prendra donc dans la suite des calculs la valeur de 250 °C pour cette température, soit 942 °R.

σ : Constante de Stefan Boltzmann ($0,173 \cdot 10^{-8} \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ R^4}$)

Certains auteurs utilisent pour cette température la valeur de la température de flamme adiabatique. Mais, des considérations empiriques montrent qu'un meilleur accord avec les mesures expérimentales sur des chaudières en opération est obtenu lorsqu'on pose :

$$T_g = T_e + 300 \text{ [}^\circ R\text{]} \quad (III.6)$$

En portant l'expression de (\dot{Q}_F) dans l'équation (III.4) puis en divisant par (\dot{m}_c), On obtient :

$$\frac{A_P \varepsilon_S \varepsilon_g}{\dot{m}_c} \sigma (T_g^4 - T_S^4) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} C_{P_a} T_a + (PCI) - \frac{\dot{m}_g C_{P_g} T_e}{\dot{m}_c} \quad (III.7)$$

A présent, en divisant par (\dot{m}_c) les deux membres de l'équation (III.2), on obtient :

$$\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_c} = 1 + \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} - \frac{\dot{m}_{cendres}}{\dot{m}_c} \quad (III.8)$$

Dans cette dernière équation, le rapport du débit d'air (\dot{m}_a) sur celui du combustible (\dot{m}_c) peut être exprimé en fonction de l'air théorique (A) du rapport d'air théorique (α) et du (PCS) comme suit :

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} = (A\alpha)(PCS) \cdot 10^{-6} \quad (III. 9)$$

Quant au rapport ($\frac{\dot{m}_{cendres}}{\dot{m}_c}$), il est égal à la fraction massique des cendres dans notre combustible, soit :

$$\frac{\dot{m}_{cendres}}{\dot{m}_c} = 0,1676$$

L'émissivité (ϵ_g) du gaz incandescent représenté par la flamme et son voisinage immédiat, dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la luminosité de la flamme, la nature du combustible et la teneur des gaz en cendres volatiles. C'est pourquoi il est difficile de la calculer avec une expression générale, étant donné l'impossibilité de modéliser l'influence de ces facteurs sur elle. L'émissivité des écrans est également difficile à estimer régime d'opération du four, des dépôts de suies et de cendres sur les écrans, ce qui fait qu'elle sera donc variable selon l'état de la surface des écrans qui évolue en fonction de la fréquence des interventions pour son maintien.

Dans le cas des combustibles solides en général, produisant des flammes moins lumineuses que les huiles et les combustibles gazeux, et dont la combustion s'accompagne de production de cendres et de dépôts inévitables sur les écrans, les valeurs recommandées pour (ϵ_g) et (ϵ_s)[16] sont respectivement de 0.5 et 0.6.

III.2.3 Critère pour éviter le régime d'ébullition en film dans les écrans :

A aucun moment, nous ne devons avoir à l'intérieur des tubes qui constituent les écrans d'eau une ébullition qui se produirait dans la gamme de flux au dessus du flux critique qui sépare le régime nucléée du régime d'ébullition en film. L'ébullition en film, conduirait à une mauvaise circulation de la chaleur à cause des faibles coefficients d'échange du film de vapeur par rapport à ceux du liquide. La présence de tel film de vapeur entrainerait la surchauffe, puis le perçage des tubes.

Pour éviter ce phénomène, on utilise un critère sur la densité surfacique de la charge calorifique de la chaudière. Ce critère est défini par le rapport de la charge calorifique totale de la chaudière ($\dot{m}_c PCI$) sur l'aire de la surface projetée de l'enceinte de la chambre du combustion (A_p), soit :

$$\lambda = \frac{\dot{m}_c PCI}{A_p} \quad (III. 10)$$

Ce facteur (λ) doit être compris entre 70 000 et 120 000 Btu/h.ft² pour le charbon et peut atteindre 200 000 Btu/h.ft² dans le cas du gaz naturel [16]. Ne disposant pas de valeurs de (λ) pour notre combustible, mais remarquant que plus la qualité du combustible est moins importante, plus petite est la valeur de (λ) à adopter, nous entreprenons d'analyser le

comportement du four sur l'intervalle des valeurs de (λ) entre 40 000 et 100 000 Btu/h.ft² pour sélectionner la valeur qui donnerait les meilleurs résultats. Bien entendu, à chaque fois nous calculerons le flux qui arrive à l'intérieur des tubes écrans pour vérifier qu'il est bien inférieur au flux critique dont la valeur est autour de 250 000 Btu/h.ft² [16] .

A partir de l'expression (III.10), on tire :

$$\frac{A_p}{\dot{m}_c} = \frac{(PCI)}{\lambda} \quad (III.11)$$

Ensuite, on revient à l'expression (III.7) et on pose pour le membre de gauche (MG) et le membre de droite (MD) :

$$MG = \left(\frac{A_p}{\dot{m}_c}\right) \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_g \cdot \sigma(T_g^4 - T_s^4) \quad (III.12)$$

$$MD = \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c}\right) C_{Pa} + (PCI) - \left(\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_c}\right) C_{Pg} T_e \quad (III.13)$$

Notons que la seule inconnue de l'équation ($MG = MD$) est la température (T_e) puisque (T_g) est fonction de (T_e) (voir équation (III.6)). Mais comme l'équation est au 4^{ème} degré, nous devons procéder par itération successives afin d'obtenir la valeur de (T_e), puis on calcule séparément MG et MD et selon que $MG > MD$ ou inversement, on refait le calcul pour une plus grande valeur ou une plus petite valeur de (T_e), jusqu'à convergence du processus lorsque ($MG = MD$) .

III.2.4 Calcul de la chaleur mise en jeu au niveau de la chambre de combustion :

Pour évaluer la quantité de chaleur \dot{Q}_F intervenant dans le bilan d'énergie de la chambre de combustion, il est nécessaire de connaître le débit de combustible \dot{m}_c . Cependant, ce débit nous ne pouvons que l'estimer à partir des besoins en énergie de notre procédé et du pouvoir calorifique du combustible.

A l'instar du facteur λ , le débit de combustible sera donc utilisé comme paramètre à faire varier dans les calculs.

Avec \dot{m}_c connu, on peut calculer la surface projetée, puisque le rapport $\frac{A_p}{\dot{m}_c}$ est obtenu à partir de l'équation (III.11)

A présent, on calcule :

$$\frac{\dot{Q}_F}{A_p} = \varepsilon_s \cdot \varepsilon_g \cdot \sigma(T_g^4 - T_s^4) \quad (III.14)$$

Puis :

$$\dot{Q}_F = \left(\frac{\dot{Q}_F}{A_p}\right) \cdot A_p \quad (III.15)$$

III.2.5 Calcul du flux de chaleur par unité de surface intérieure des tubes-écrans :

Ayant opté pour une paroi à membrane (voir chapitre II), si l'on fait une coupe transversale dans cette paroi, nous pouvons noter que sa configuration se reproduit avec pas S_t connue représenté à la figure ci-après

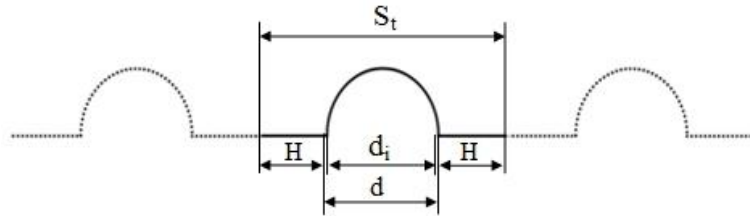


Figure III-2 Coupe transversale de la paroi à membrane

Pour une longueur L des tubes, la surface projetée sera donnée par :

$$A_p = S_t \cdot L \cdot n = (2H + d) \cdot L \cdot n \quad (III.16)$$

n : étant le nombre de modules comme celui de la figure, qui sont nécessaires pour concevoir l'enceinte de la chambre de combustion.

La surface réelle de la paroi du côté extérieur, exposée au gaz sera quant à elle donnée par :

$$A_e = \left(2H + \frac{\pi d}{2}\right) \cdot L \cdot n \quad (III.17)$$

Par conséquent, en posant :

$$\dot{q}_p = \frac{\dot{Q}_F}{A_p} : \text{Le flux de chaleur par unité de surface projetée}$$

$$\text{Et } \dot{q}_e = \frac{\dot{Q}_F}{A_e} : \text{Le flux de chaleur par unité de surface extérieure des écrans}$$

$$\text{On aura : } \dot{Q}_F = \dot{q}_e \cdot A_e = \dot{q}_p \cdot A_p$$

D'où le flux par unité de surface extérieure des écrans :

$$\dot{q}_e = \dot{q}_p \cdot \frac{A_p}{A_e} = \dot{q}_p \cdot \frac{2H + d}{2H + \frac{\pi d}{2}} \quad (III.18)$$

Et le flux par unité de surface intérieure des tubes (\dot{q}_i) sera :

$$\dot{q}_i = \dot{q}_e \cdot \frac{d}{d_i} = \dot{q}_p \cdot \frac{2H + d}{2H + \frac{\pi d}{2}} \cdot \frac{d}{d_i} \quad (III.19)$$

Soit encore :

$$\dot{q}_i = \left(\frac{\dot{Q}_F}{A_p}\right) \cdot \frac{2H + d}{2H + \frac{\pi d}{2}} \cdot \frac{d}{d_i} \quad (III.20)$$

En notant :

$$\delta = \frac{2H + d}{2H + \frac{\pi d}{2}} \cdot \frac{d}{d_i}$$

On aura :

$$\dot{q}_i = \left(\frac{\dot{Q}_F}{A_p} \right) \cdot \delta \quad (III. 21)$$

Remarquons que δ dépend des dimensions de la configuration choisie pour les écrans. Pour de faibles pressions et pressions modérées du côté eau, on recommande des diamètres nominaux des tubes de 2in et une hauteur d'ailette $H=1$ in [16]

A partir des données standards sur les tubes, on a : $d_i = 1,706$ in

Avec ces données le facteur $\delta = 0,912$

III.3 Zone de convection :

Rappelons que cette zone comprend les différents échangeurs de chaleur de notre chaudière, nous savons d'après les données de base des conditions thermodynamiques de l'eau, et de la vapeur d'eau aux différentes entrées et sorties de ces échangeurs. Nous savons également en ce qui concerne le réchauffeur d'air les températures du côté air à l'entrée et à la sortie. Nous connaissons le débit d'eau et le débit d'air est lié au débit de combustible \dot{m}_c et au rapport d'air théorique (α) utilisé. Il s'agira de calculer les températures des gaz de combustion aux différentes entrées-sorties des échangeurs parcourus. Ceci va se faire par les bilans d'énergie appliqués à chaque échangeur, en admettant partout 1% de pertes et en négligeant les effets cinétique et potentiels.

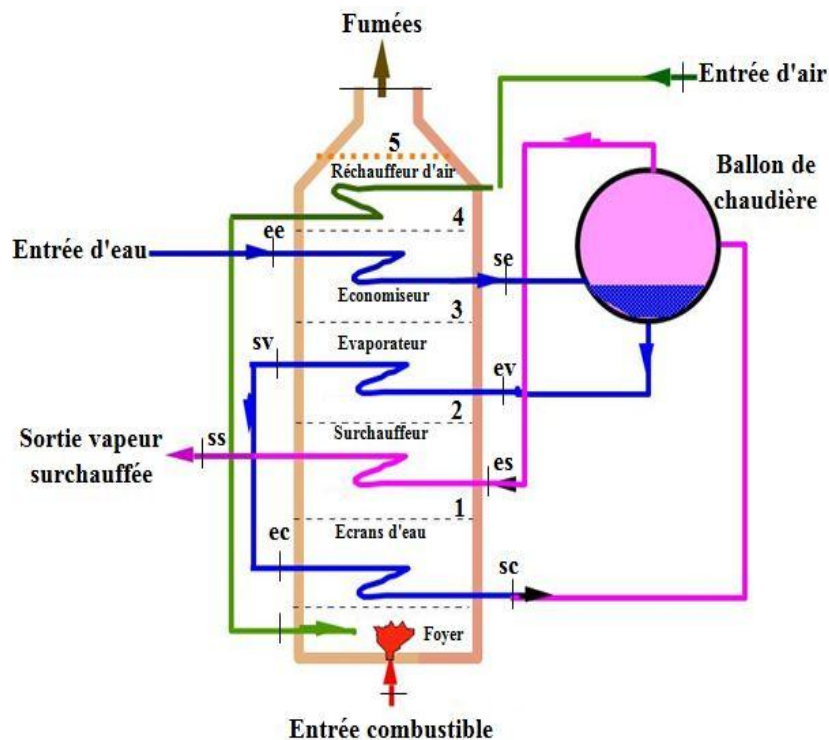


Figure III-3 Schéma de la zone de convection

Le schéma de la figure (III.3) ci-dessus montre que les différents échangeurs de la chaudière, ainsi que leur position par rapport au circuit des gaz

III.3.1 Calcul de la température des gaz à la sortie du surchauffeur T_2 :

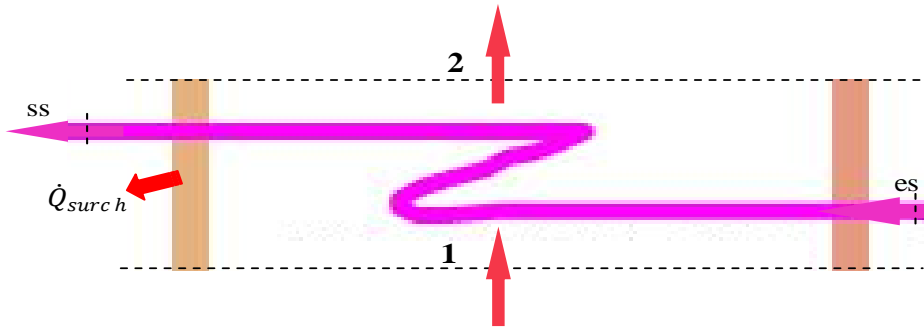


Figure III-4 Schéma du surchauffeur

Le surchauffeur est repris à la figure (III.4) ci-dessus. En nous référant aux notations de figure, le bilan d'énergie pour le surchauffeur s'écrit :

$$\dot{Q}_{surch} + \dot{m}_v h_{es} + \dot{m}_g C_{p_{gs}} T_1 = \dot{m}_v h_{ss} + \dot{m}_g C_{p_{gs}} T_2 \quad (III. 22)$$

En remarquant que :
 $\dot{m}_{es} = \dot{m}_{ss} = \dot{m}_v$

On peut mettre l'expression du bilan ci-dessus sous la forme :

$$\dot{Q}_{surch} + \dot{m}_g C_{p_{gs}} (T_1 - T_2) = \dot{m}_v (h_{ss} - h_{es}) \quad (III. 23)$$

Le 1% de pertes au niveau du surchauffeur se traduit par :

$$\dot{Q}_{surch} = -0,01 \dot{m}_g C_{p_g} (T_1 - T_2) \quad (III. 24)$$

Ce qui donne finalement la température des gaz à la sortie du surchauffeur :

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_g} \cdot \frac{h_{ss} - h_{es}}{0,99 C_{p_{gs}}} \quad (III. 25)$$

III.3.2 Calcul de la température des gaz à la sortie de l'évaporateur T_3 :

Cette température, s'obtient en effectuant le bilan d'énergie pour la partie de l'évaporateur qui se trouve dans la zone de convection. Mais pour établir ce bilan il nous faut d'abord calculer la part de l'énergie nécessaire à l'évaporation complète de l'eau à ce niveau, sur la base de la chaleur \dot{Q}_F reçue au niveau des écrans d'eau dans le four.

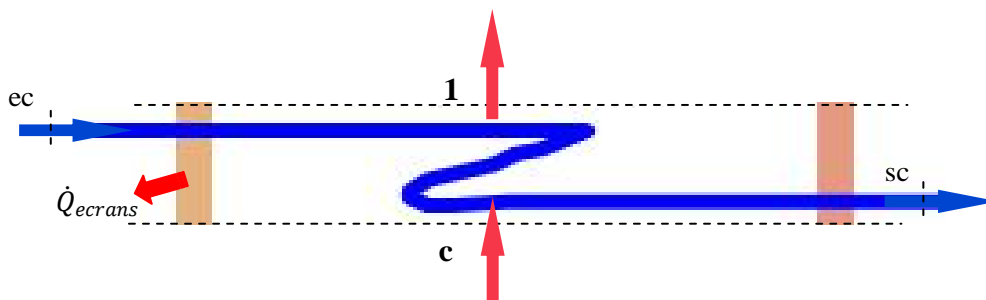


Figure III-5 Schéma des écrans d'eau

Dimensionnement thermique de la chaudière

Nous allons donc tout d'abord considérer le bilan sur les écrans afin de calculer l'enthalpie de la vapeur à l'entrée de la partie de l'évaporateur qui se trouve dans la zone de convection. En nous référant aux notations de la figure (III.5) et en tenant compte des 1% de pertes, le bilan sur les écrans donne :

$$0,99 \cdot \dot{Q}_F + \dot{m}_{ec} h_{ec} = \dot{m}_{sc} h_{sc} + \dot{m}_p h_p \quad (III.26)$$

Avec :

$$\dot{m}_{ec} = \dot{m}_v + \dot{m}_p$$

$$\dot{m}_{sc} = \dot{m}_v$$

$$h_{ec} = h_{f235^\circ\text{C}}$$

$$h_{sc} = h_{f240^\circ\text{C}} + x \cdot h_{fg240^\circ\text{C}}$$

$$h_p = h_{f240^\circ\text{C}}$$

Où : $\dot{m}_v = 60 \text{ t/h}$: Débit principal de vapeur produite.

$\dot{m}_p = 3 \text{ t/h}$: Débit des purges évacuées à l'état de liquide saturé à 240°C

En remplaçant dans l'expression du bilan ci-dessus, on peut la résoudre pour calculer le titre de la vapeur réalisable avec l'absorption de la chaleur \dot{Q}_F au niveau des écrans.

$$x = \frac{0,99 \cdot \dot{Q}_F - (\dot{m}_v + 3)(h_{f240^\circ\text{C}} - h_{f235^\circ\text{C}})}{\dot{m}_v \cdot h_{fg240^\circ\text{C}}} \quad (III.27)$$

A présent, l'enthalpie que l'eau peut atteindre avec la chaleur qu'elle reçoit dans les écrans sera :

$$h_{sc} = h_{f240^\circ\text{C}} + x \cdot h_{fg240^\circ\text{C}}$$

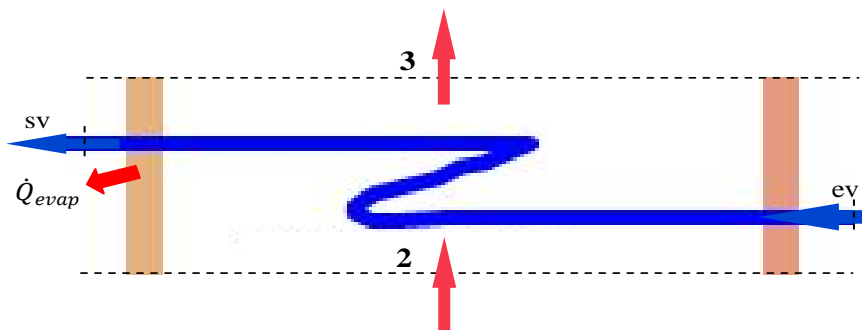


Figure III-6 Schéma de l'évaporateur

Et la quantité d'énergie que les gaz doivent apporter à la vapeur au niveau de la partie évaporateur de la zone de convection sera, d'après la figure (III.6) : $\dot{m}_v (h_{sv} - h_{ev})$

Avec :

$$h_{ev} = h_{sc}$$

$$h_{sv} = h_{es} = h_{g(240^{\circ}\text{C})}$$

A présent, le bilan sur cette partie de l'évaporateur donne en tenant compte des 1% de pertes :

$$0,99\dot{m}_g C_{P_{gv}}(T_2 - T_3) = \dot{m}_v(h_{sv} - h_{ev}) \quad (III.28)$$

D'où :

$$T_3 = T_2 - \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_g} \cdot \frac{h_{sv} - h_{ev}}{0,99C_{P_{gv}}} \quad (III.29)$$

III.3.3 Calcul de la température des gaz à la sortie de l'économiseur T_4 :

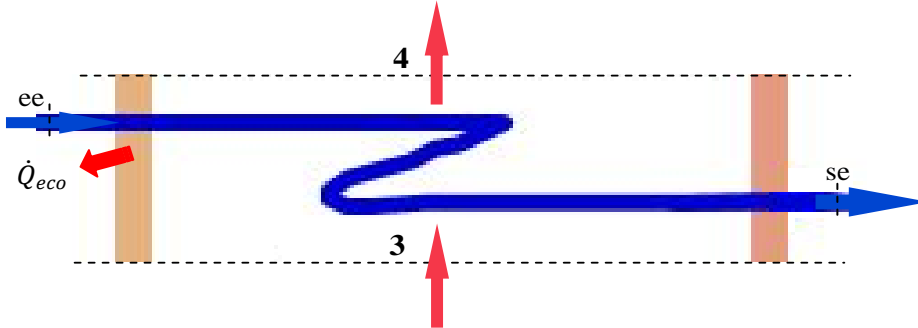


Figure III-7 Schéma de l'économiseur

En nous référant aux notations de la figure (III.7) et en rappelant que le débit d'eau qui circule à travers l'économiseur comprend le débit principal de vapeur (\dot{m}_v) et le débit qui sera purgé (\dot{m}_p) et que l'eau doit quitter l'économiseur à 235°C , 5°C de moins que la température d'évaporation pour éviter tout risques de « steaming » dans l'économiseur, le bilan

$$0,99\dot{m}_g C_{P_{ge}}(T_3 - T_4) = (\dot{m}_v + \dot{m}_p)(h_{se} - h_{ee}) \quad (III.30)$$

D'où on a la température des gaz à la sortie de l'économiseur :

$$T_4 = T_3 - \frac{\dot{m}_v + \dot{m}_p}{\dot{m}_g} \cdot \frac{h_{se} - h_{ee}}{0,99C_{P_{ge}}} \quad (III.31)$$

Avec :

$$h_{se} = h_{f235^{\circ}\text{C}}$$

$$h_{ee} = h_{f110^{\circ}\text{C}}$$

III.3.4 Calcul de la température des gaz à la sortie du réchauffeur d'air T_5 :

Le schéma du réchauffeur d'air, accompagné des notations correspondant aux entrées-sorties de l'air et des gaz est représenté à la figure (III.8).

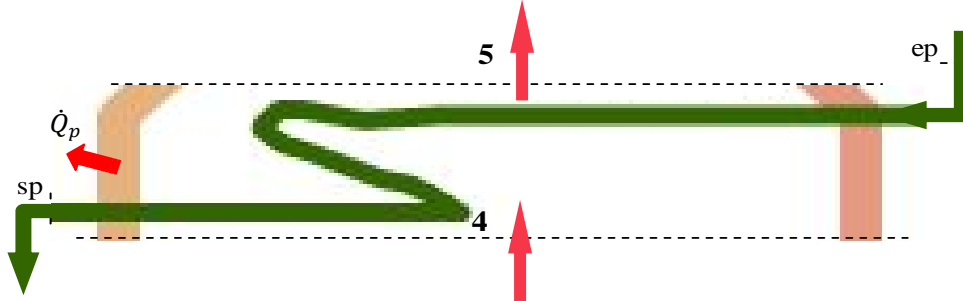


Figure III-8 Schéma du réchauffeur d'air

Le bilan d'énergie appliqué au réchauffeur s'écrit comme suit :

$$0,99\dot{m}_g C_{P_{gR}}(T_4 - T_5) = \dot{m}_a C_{P_a}(T_a - T_0) \quad (III. 32)$$

D'où on obtient la température des gaz à la sortie :

$$T_5 = T_4 - \frac{\dot{m}_a C_{P_a}}{0,99\dot{m}_g C_{P_{gR}}}(T_a - T_0) \quad (III. 33)$$

III.3.5 Calcul de la température des gaz à la sortie du préchauffeur d'eau T_6 :

En plus des échangeurs que nous venons de considérer, notre chaudière comprend en annexe un préchauffeur d'eau qui va nous permettre de récupérer d'avantage d'énergie avant de lâcher les fumées dans la cheminée, et ce dans le but d'élever la température d'eau d'alimentation de 35°C à 66°C et contribue à éviter de l'envoyer à des températures qui favorisent la condensation à partir des fumées au sein même de la chaudière.

Le schéma du préchauffeur d'eau est donné à la figure (III.9).

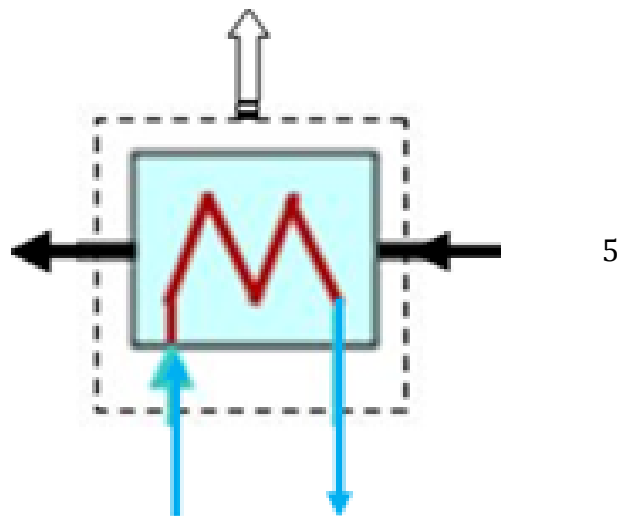


Figure III-9 Schéma du préchauffeur d'eau

Le bilan d'énergie s'écrit :

$$0,99\dot{m}_g C_{PgP}(T_5 - T_6) = \dot{m}_e(h_{sp} - h_{ep}) \quad (III.34)$$

D'où on aura la température des gaz à la sortie :

$$T_6 = T_5 - \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} \cdot \frac{h_{sp} - h_{ep}}{0,99C_{PgP}} \quad (III.35)$$

Avec :

$$\dot{m}_e = 59 \frac{t}{h}$$

$$h_{sp} = h_{f66^\circ\text{C}}$$

$$h_{ep} = h_{f35^\circ\text{C}}$$

III.4 Données nécessaires aux calculs :

III.4.1 Calcul des chaleurs spécifiques

Pour l'évaluation des chaleurs spécifiques des gaz et de l'air, nous avons utilisé une corrélation qui exprime la chaleur spécifique des différents espèces entrant dans la composition de ces gaz, à savoir CO₂ ; H₂O ; N₂ ; SO₂ ; O₂ en fonction de la température.

Cette corrélation tirée à partir de la source [18] est donnée en annexe [Tableau A-1]

Pour l'air et les gaz qui sont considérés comme des gaz parfaits, la chaleur spécifique a une température T donnée est calculée par l'expression :

$$C_p = \sum x_i C_{pi} \quad (III.36)$$

Avec :

x_i : Fraction massique du constituant (i)

C_{pi} : Chaleur spécifique massique à pression constante du constituant (i) à la température T

Lorsqu'il s'agit d'effectuer les bilans des échangeurs les chaleurs spécifiques utilisées sont des chaleurs spécifiques moyennes évaluées à la température moyenne arithmétique du gaz entre l'entrée et la sortie de l'échangeur .Il en est ainsi pour $C_{p_{gs}}$ au niveau du surchauffeur, de même pour $C_{p_{gv}}$ au niveau de l'évaporateur, etc...

Les enthalpies de l'eau et de la vapeur d'eau :

Pour la lecture des enthalpies de l'eau et de la vapeur d'eau, nous avons utilisé les tables des propriétés thermodynamiques de la substance pure pour la vapeur d'eau [18]

Les valeurs lues pour les différentes enthalpies qui figurent dans les expressions de calculs utilisées dans le chapitre, sont récapitulées au tableau (III.1)

Tableau III-1 Propriétés de l'eau et de la vapeur d'eau

		T (°C)	P (bar)	Débit ($\frac{T}{h}$)	Enthalpie ($\frac{kJ}{kg}$)
Préchauffeur d'eau	ep	35	6	59	147,19
	sp	66	6	59	276,69
Réchauffeur d'air	er	25	1	\dot{m}_a	25,30
	sr	100	1	\dot{m}_a	101,77
Economiseur	ee	110	35	63	461,3
	se	235	35	63	1013,62
Ecrans d'eau	ec	240	35	63	1013,62
	sc	240	35	60	$h_{f240^\circ\text{C}} + x \cdot h_{fg240^\circ\text{C}}$
Evaporateur	ev	240	35	60	$h_{f240^\circ\text{C}} + x \cdot h_{fg240^\circ\text{C}}$
	sv	240	35	60	2803,8
Surchauffeur	es	240	35	60	2803,8
	ss	375	32	60	3169,62

On admet que le combustible est admis au four à 25°C, c'est également la valeur de la température de l'air T_0 à l'entrée du réchauffeur.

Toutes autres données concernant le combustible et les fumées issues de la combustion en particulier leur composition suivant le rapport d'air théorique α figurent dans les tableaux présentés au chapitre II

III.5 Procédure de calcul :

Pour procéder aux calculs exposés tout au long de ce chapitre, les données que nous venons de rappeler et d'introduire ne suffisent pas. Il est nécessaire en effet de connaître le rapport d'air théorique (α), le paramètre λ défini par l'équation (III.10) et enfin le débit de combustible \dot{m}_c .

α , λ et \dot{m}_c seront donc les degrés de liberté qui vont nous permettre d'explorer les possibilités opératoires de notre chaudière pour répondre aux besoins du problème tout en satisfaisant à certaines contraintes techniques.

Nous avons déjà exposé au chapitre II le rôle que joue le rapport d'air théorique α dans l'accomplissement du processus de combustion et la contrôle de la température de flamme, qui diminue lorsque α augmente, mais qui fait également augmenter le pouvoir fumigène devient plus important. Il y a donc une valeur optimale de α qui réalise un compromis entre ces exigences contradictoires.

Dans le cas de la combustion des déchets, il est recommandé d'utiliser une valeur de α située entre 1,5 et 1,8

Dimensionnement thermique de la chaudière

En ce qui concerne le facteur λ , nous avons déjà rappelé qu'il doit être dans l'intervalle $40\,000 \frac{Btu}{h \cdot ft^2}$ et $100\,000 \frac{Btu}{h \cdot ft^2}$

Quant au débit de combustible \dot{m}_c , il dépend principalement de la charge calorifique nécessaire pour la production des $60 \frac{t}{h}$ de vapeur surchauffée dans les conditions imposées de $375^\circ C$; $32\ bar$.

Dans ces conditions, l'enthalpie spécifique de la vapeur est lue au tableau [18], elle est de $3169.62 \frac{kJ}{kg}$.

Par ailleurs à l'entrée à $110^\circ C$, $35\ bar$ l'enthalpie spécifique de l'eau est de $463.72 \frac{kJ}{kg}$.

Donc, les besoins en énergie pour produire la vapeur seront de :

$$\begin{aligned} 60 \left(\frac{t}{h} \right) \cdot 10^3 \left(\frac{kg}{t} \right) \cdot \frac{1}{3600} \left(\frac{h}{s} \right) \cdot (3169,62 - 463,72) \\ = 162\,354 \frac{MJ}{h} \end{aligned}$$

En estimant à 0.80 le rendement de la chaudière, la charge calorifique estimée pour cette dernière sera donc :

$$\frac{162\,354}{0.80} = 202\,942 \frac{MJ}{h}$$

La quantité de combustible nécessaire sera donc évaluée en divisant cette charge par le PCI du combustible :

$$\frac{202\,942}{10805} \cdot 10^3 = 18.78 \frac{t}{h}$$

L'analyse sera donc menée pour les trois valeurs de \dot{m}_c suivantes : $(19 \frac{t}{h}; 20 \frac{t}{h}; 21 \frac{t}{h})$

Pour chaque valeur de $(\alpha) \in \{1.50; 1.60 \text{ et } 1.70\}$, on a fait varier (λ) de $40\,000 \frac{Btu}{h \cdot ft^2}$ et $100\,000 \frac{Btu}{h \cdot ft^2}$ par pas de $10\,000$ et pour chaque couple de valeurs $(\alpha; \lambda)$, on a exécuté les calculs pour les trois valeurs de \dot{m}_c .

Les résultats des calculs sont représentés dans les tableaux (A-2 à A-8) insérés en annexe et discutés au chapitre IV suivant pour choisir les paramètres de fonctionnement qui répondent le mieux aux exigences du problème.

Chapitre IV :
Exploitation des résultats

IV.1 Introduction

Le dimensionnement thermique de la chaudière que nous nous sommes fixés pour objectif dans cette étude sera parachevé par le choix de trois valeurs pour les paramètres α , λ et \dot{m}_c .

Les calculs effectués nous permettent notamment de connaître les températures des gaz de combustion à tous les endroits pertinents de la chaudière : de la chambre de combustion jusqu'à la cheminée. Les résultats de ces calculs figurent dans les tableaux insérés en annexes. Suivant le circuit des fumées, chaque température correspondant à une position donnée (four, entrée surchauffeur, entrée évaporateur, etc...) peut être connue pour un jeu de valeurs des trois paramètres α , λ et \dot{m}_c . Pour faciliter la lecture de ces résultats, nous avons tracé les graphiques des figures IV-1 à IV-3 ci-après.

IV.2 Présentation des résultats

IV.2.1 Température de flamme et d'évacuation des gaz

Sur la première de ces figures, la figure IV-1 ci-dessous, nous avons représenté l'évolution de la température de flamme T_c en fonction du rapport d'excès d'air α pour une température d'air à l'entrée de la chambre de combustion $T_a = 100$ °C.

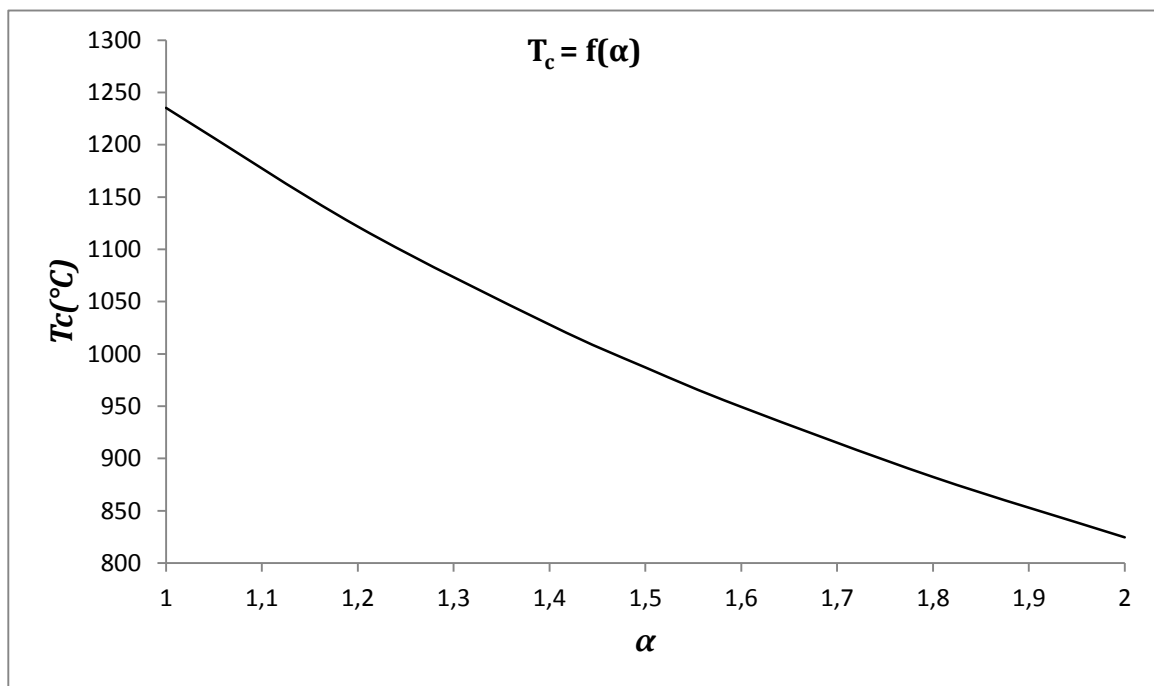


Figure IV-1 Variation de la température de flamme en fonction de l'excès d'air

Exploitation des résultats

La température de flamme ne dépend en effet, ni du paramètre λ , ni du débit de combustible brûlé dans le four. Elle ne dépend que du rapport d'air théorique en présence duquel a lieu la combustion, avec lequel elle décroît linéairement, et de la température à laquelle l'air est introduit dans la chambre de combustion, avec laquelle elle croît cette fois-ci linéairement comme le montre la figure IV-2 ci-dessous. Sur cette même figure, nous avons également représenté l'évolution de la température T_6 , celle qu'on a à l'autre bout du circuit des fumées, juste au moment de quitter la zone où on a puisé dans l'énergie qu'elles transportent et s'engouffrer dans la cheminée. Cette température est particulièrement importante dans le sens où elle est révélatrice des pertes sensibles à la cheminée, pertes qui lui sont directement proportionnelles pour un débit de gaz donné. Comme le montre la figure, cette température évolue très peu en fonction de la température de l'air T_a . Autrement dit, lorsqu'on augmente la température de l'air à l'entrée du four, l'écart $(T_c - T_6)$, auquel est proportionnelle la quantité d'énergie cédée par les gaz de combustion au niveau de la chaudière pour un débit de combustible donné (ici 20 t/h), augmente et améliore les performances énergétiques de la chaudière. Mais, à l'opposé de la température de flamme T_c qui ne dépend que de α et de T_a , la température T_6 , à l'instar des autres températures du circuit des gaz, dépend également du débit de combustible \dot{m}_c et du facteur λ .

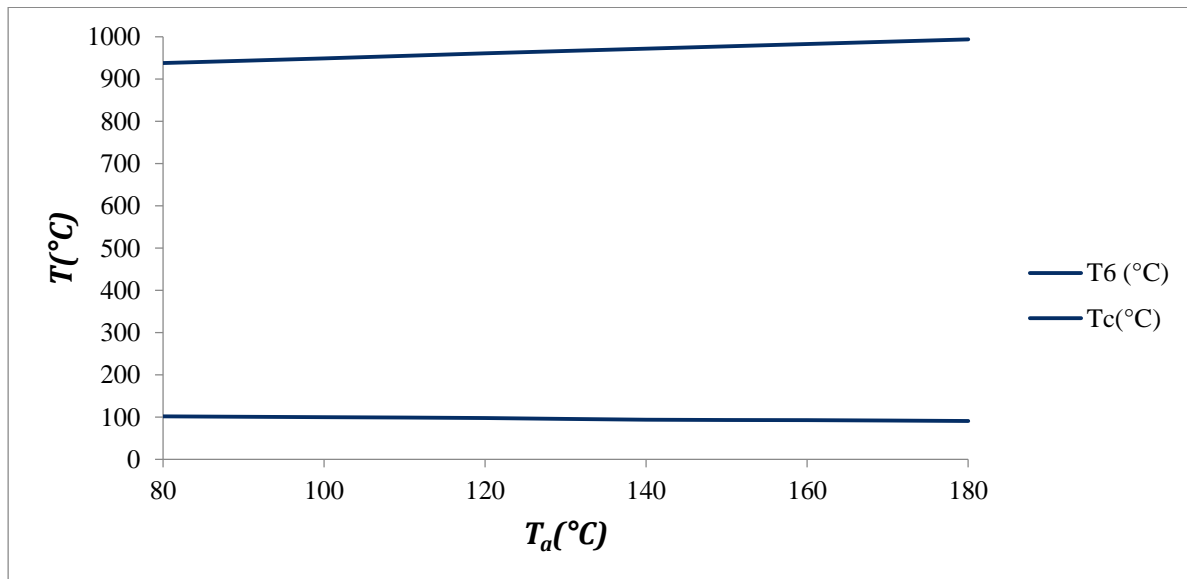


Figure IV-2 Variation de la température de flamme et de la température d'évacuation des gaz en fonction de la température de l'air

IV.2.2 Températures des fumées à travers la zone de convection

A la figure IV-3 ci-dessous, nous représentons l'évolution des différentes températures du circuit des gaz en fonction du débit de combustible pour 60 % d'excès d'air à une température $T_a = 100^\circ\text{C}$ et un facteur $\lambda = 50\,000 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$. Nous relevons que, à

Exploitation des résultats

l'exception de la température de flamme T_c qui reste constante car ne dépendant que de α et T_a et de la température des gaz à la sortie du four T_1 qui reste également constante car

dépendant en plus uniquement de λ , toutes les autres températures croissent avec le débit de combustible, particulièrement celles situées en aval de l'évaporateur T_3 à l'entrée de l'économiseur, T_4 à l'entrée du réchauffeur d'air, T_5 à sa sortie et T_6 à la sortie du préchauffeur d'eau, et donc à la cheminée d'évacuation des fumées.

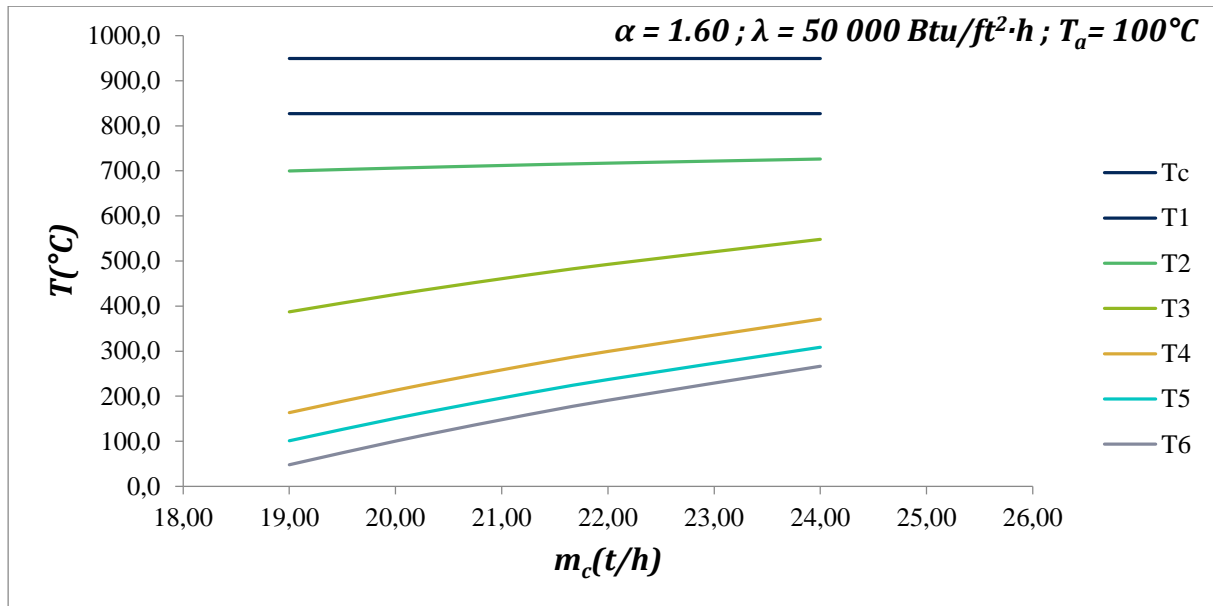


Figure IV-3 Variation des températures des fumées à travers la zone de convection

IV.2.3 Choix des paramètres opératoires

Nous devons examiner ces températures en veillant notamment à ce que :

- A aucun point, la température des gaz ne doit approcher la limite correspondant au ramollissement des cendres, nous nous fixons donc, à titre conservatif, comme limite à ne pas dépasser la valeur de 1000°C , puisque cette température est typiquement une valeur de température de ramollissement des cendres citée pour les déchets. Comme nous l'avons déjà rapporté au chapitre II, l'excès d'air utilisé dans les combustions des déchets est situé entre 50% et 70% selon la qualité combustible du déchet. Il est évident que si un tri sélectif est effectué à la source et qu'on destine à la combustion les déchets les plus combustibles l'excès d'air nécessaire à une combustion suivant ce tri nécessitera moins d'excès d'air qu'une combustion sans tri.

Exploitation des résultats

Cependant, au vu des calculs concernant la température de flamme (Tableau A-3), un apport d'air théorique de 1.5 ne doit pas être utilisé puisque, pour toutes les valeurs de λ et \dot{m}_c considérées dans la présente analyse, la température de flamme à laquelle la combustion donnera lieu en présence d'un tel rapport d'air théorique sera très proche de la valeur que nous nous sommes fixés comme limite à ne pas atteindre.

- A la sortie de la chaudière, la température ne doit, en principe, en aucun cas descendre en dessous du point de rosée acide des fumées. Ce point de rosée est cependant très difficile à évaluer. Mais, on sait qu'il est dû surtout à la présence de soufre dans la composition du combustible. Dans les fumées, le soufre est présent sous forme de SO_2 , ensuite à mesure que les fumées se refroidissent, le SO_3 en lequel il commence à se transformer dès que la température descend en dessous de $200\text{ }^\circ\text{C}$, forme avec la vapeur d'eau un acide qui risque de provoquer la corrosion des équipements en cas de condensation. La température de condensation acide est d'autant plus élevée que la teneur du combustible en soufre est importante. Dans notre cas, cette teneur étant relativement faible, on pourrait situer le point de rosée acide un peu plus au dessus de $100\text{ }^\circ\text{C}$. Cependant, même lorsque les fumées sont à des températures au dessus du point de rosée, la condensation pourrait avoir lieu si l'eau est à des températures plus basses.

En examinant les résultats obtenus pour $\dot{m}_c = 19\text{ t/h}$ (voir tableaux A-5 à A-7 insérés en annexe), on voit immédiatement qu'un tel débit ne permettra pas d'utiliser le préchauffeur d'eau, étant donné que les températures des fumées sont déjà trop basses au niveau du réchauffeur d'air et un pincement même se produit dans le préchauffeur d'eau, ce qui rend impossible tout transfert de chaleur dans cet échangeur.

Il nous reste donc 4 couples de valeurs (\dot{m}_c, α) : (20 t/h , 1,6) ; (21t/h, 1,6) ;(20 t/h ,1,7) ; (21t/h, 1,7) :

Pour $\dot{m}_c = 21\frac{\text{t}}{\text{h}}$, $\alpha = 1,6$ les températures T_6 sont supérieures à 140°C .Ceci entrainerait une perte sensible importante à la cheminée.

Pour $\dot{m}_c = 20\frac{\text{t}}{\text{h}}$, $\alpha = 1,7$ les températures T_6 sont trop basses et font courir un grand risque de corrosion acide au préchauffeur d'eau.

Les deux scénarios restants sont à analyser un peu plus profondément. Si on peut considérer notre déchet comme étant de bonne qualité combustible une combustion en présence de 60 % d'excès d'air serait alors suffisante et nous permettra d'économiser 1 tonne d'un déchet de bonne qualité par heure en brûlant seulement $20\frac{\text{t}}{\text{h}}$. Si au contraire notre déchet étant de moindre qualité combustible il sera nécessaire de réaliser la combustion en présence de 70% d'excès d'air pour qu'elle soit complète et dans ce cas nous devront brûler $21\frac{\text{t}}{\text{h}}$.

Au vu du pouvoir calorifique du déchet que nous avons choisi pour cette étude il est légitime de le considérer comme ayant les qualités requises pour une combustion complète en présence de 60% d'excès d'air

Pour $\alpha = 1,6$ et $\dot{m}_c = 20 \frac{t}{h}$, les valeurs de T_1 (Température des gaz de combustion à la sortie du four) sont trop proches de la température de flamme pour les valeurs élevées de λ .

Ainsi, pour $\lambda = 60\,000 \frac{Btu}{ft^2 \cdot h}$, $T_1 = 855^\circ C$ alors que $T_c = 950^\circ C$ il n'y a donc qu'une différence de moins de $100^\circ C$ entre les deux températures, ce qui n'est en accord avec les hypothèses de calcul de T_1 dans le four, où on a supposé une différence de l'ordre de $150^\circ C$. C'est pourquoi, nous nous contenterons d'un choix très modeste pour λ en prenant la valeur de $\lambda = 50\,000 \frac{Btu}{ft^2 \cdot h}$ pour laquelle T_1 affiche $827^\circ C$

Nous optons donc pour un débit de combustible de $20 t/h$, qui nous permet de réaliser des conditions opératoires adéquates (sauf peut être pour la dernière partie du préchauffeur d'eau où la température des fumées sera en dessous du point de rosée acide) tout en économisant une tonne de déchets par heure. Notons que, la teneur en soufre de nos déchets étant faible, même s'il y a condensation, l'acidité du condensat ne sera pas importante, et il y aura encore la possibilité de concevoir l'échangeur en plusieurs modules de façon à choisir un dernier module, concerné par la condensation donc, en un matériau, certes plus coûteux, mais résistant à la corrosion.

IV.2.4 Tracé des profils de températures à travers la chaudière

Tracé des profils de température à travers la chaudière pour $\dot{m}_c = 20 t/h$ et pour $\dot{m}_c = 21 t/h$.

Ces profils sont une représentation de la température des fluides, air, eau, et fumées, en cumulant en abscisse l'énergie transférée à partir des gaz de combustion depuis leur production dans le four jusqu'à leur évacuation en tant que fumées par la cheminée. Les quantités d'énergie transférées au niveau de chaque échangeur sont représentées par leur pourcentage de l'énergie totale transférée dans la chaudière. Cette dernière comprend celle fournie à l'eau dans le préchauffeur d'eau \dot{E}_p , celle fournie à l'air dans le réchauffeur d'air \dot{E}_R , celle fournie à l'économiseur \dot{E}_e , celle fournie à la partie de l'évaporateur située dans la zone de convection \dot{E}_v , celle fournie au surchauffeur \dot{E}_s , et enfin celle fournie aux écrans d'eau \dot{E}_c . L'énergie totale fournie étant la somme de toutes ces énergies, on notera donc :

$$\dot{E} = \dot{E}_p + \dot{E}_R + \dot{E}_e + \dot{E}_v + \dot{E}_s + \dot{E}_c$$

et les pourcentages alloués à chaque échangeur (i), i=p, R, e, v, s et c:

Exploitation des résultats

$$\varphi_i = \frac{\dot{E}_i}{\dot{E}} * 100$$

Pour les deux scénarios retenus précédemment, il s'agira de tracer le profil des températures des gaz et de l'eau à travers la chaudière , les tableaux IV-1 et IV-2 regroupent les données nécessaires pour ce faire

**Tableau IV-1 Données nécessaires pour le tracé du profil de températures pour
mc=20 t/h**

$\dot{m}_c = 20\text{t/h}$	\dot{E}_i (kJ/h)	φ_i (%)	Abscisse	$T_{\text{entrée}}$ (°C)	T_{sortie} (°C)
Ecran d'eau	58310362	32,09	32,09	240	240
Surchauffeur	21949200	12,08	44,17	375	240
Evaporateur	49171538	27,06	71,24	240	240
Economiseur	34796160	19,15	90,39	235	110
Réchauffeur d'air	9823004	5,41	95,79	100	25
Préchauffeur d'eau	7644040	4,21	100,00	66	35
Total : \dot{E} (kJ/h)	181694304	100			

Exploitation des résultats

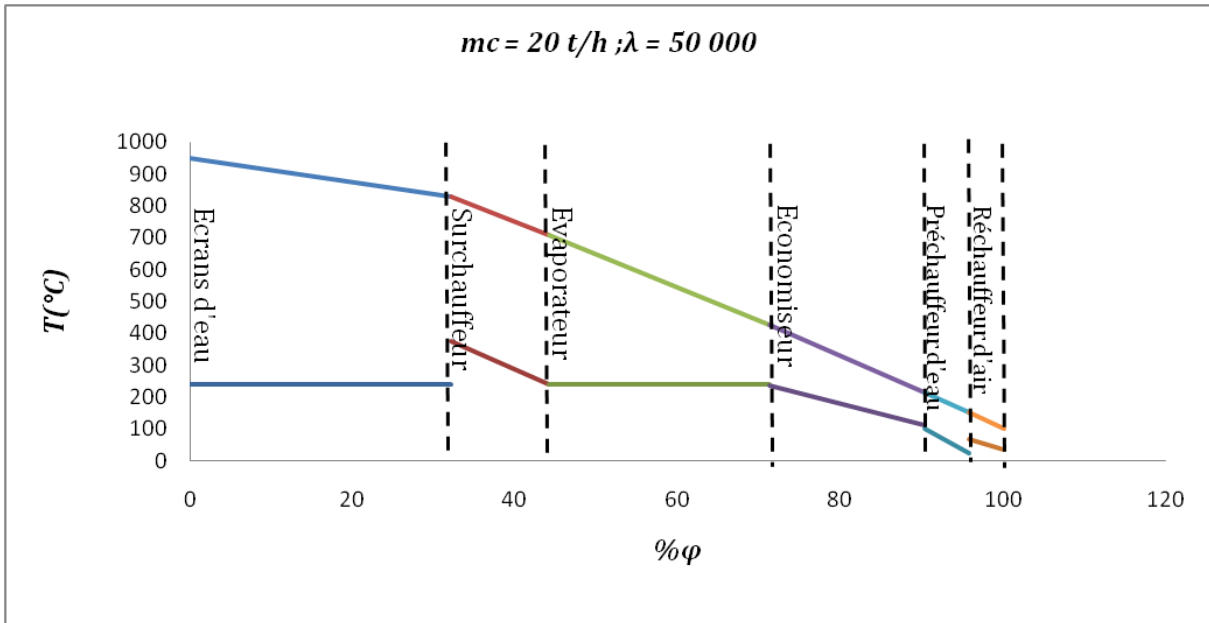


Figure IV-4 Tracé des profils de température à travers la chaudière pour $m_c=20 \text{ t/h}$ et $\lambda=50\,000 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$

Tableau IV-2 Données nécessaires pour le tracé du profil de températures pour $m_c = 21 \text{ t/h}$

$m_c = 21 \text{ t/h}$	\dot{E}_i (kJ/h)	φ_i (%)	Abscisse	$T_{\text{entrée}}$ (°C)	T_{sortie} (°C)
Ecran d'eau	61 225 880	33,61	33,61	240	240
Surchauffeur	21 949 200	12,05	45,65	375	240
Evaporateur	46 256 019	25,39	71,04	240	240
Economiseur	34 796 160	19,10	90,14	235	110
Réchauffeur d'air	10 314 154	5,66	95,80	100	25
Préchauffeur d'eau	7 644 040	4,20	100,00	66	35
Total : \dot{E} (kJ/h)	182 185 454	100			

Exploitation des résultats

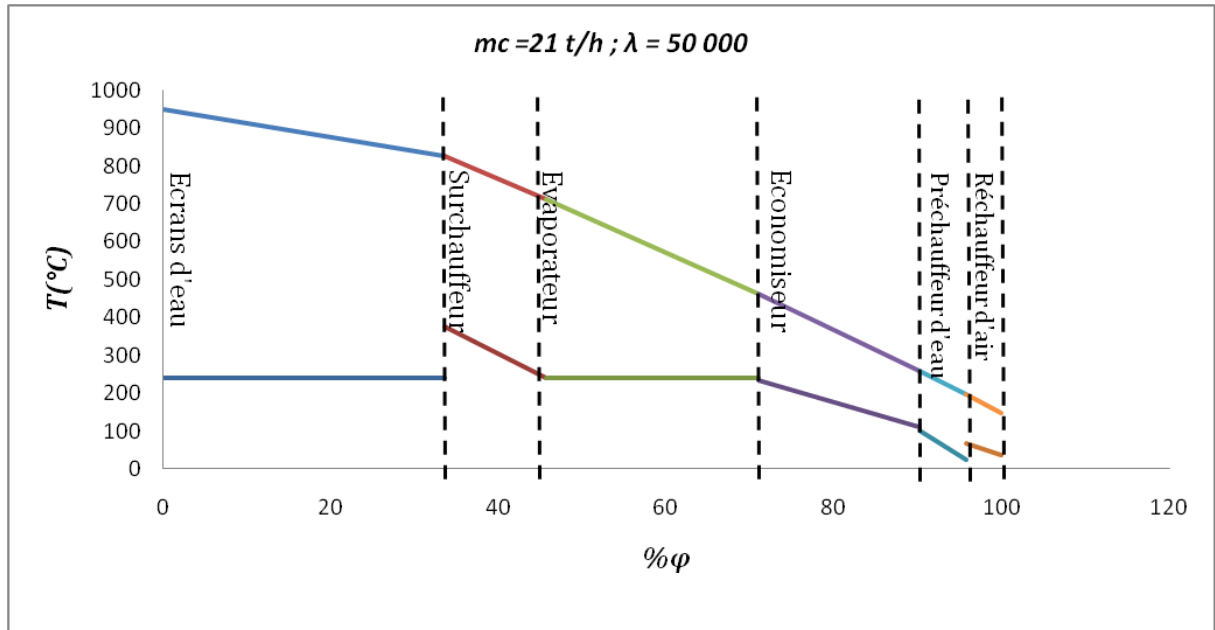


Figure IV-5 Tracé des profils de température à travers la chaudière pour $m_c=21$ t/h et $\lambda=50\,000$ Btu/(ft²·h)

Calcul du rendement: En utilisant les mêmes notations qu'au chapitre III, l'expression du rendement sera donc :

$$\eta = \frac{\dot{m}_v(h_{ss} - h_{ee}) + \dot{m}_e(h_{sp} - h_{ep})}{\dot{m}_c \cdot PCI}$$

Avec :

Tableau IV-3 Données nécessaires au calcul du rendement

\dot{m}_v	t/h	60
\dot{m}_e		59
h_{ss}		3169,62
h_{ee}	kJ/kg	461,3
h_{sp}		276.69
h_{ep}		147.19
PCI	kJ/kg	10 805

Les résultats sont résumés dans le tableau ci dessous :

Tableau IV-4 Calcul du rendement pour $\dot{m}_c=20$ t/h et $\dot{m}_c =21$ t/h

\dot{m}_c (t/h)	η (%)
20	78.73
21	74.98

D'après les figures IV-4 et IV-5 il apparaît qu'aucun pincement ne se produit lors des échanges de chaleur entre la vapeur et les gaz de combustion.

D'après les résultats inscrits au tableau IV-4 , plus le débit massique augmente plus le rendement diminue , il est donc plus intéressant d'utiliser une quantité de combustible égale à 20 t/h

IV.2.5 Estimation des dimensions principales du four

En plus du critère λ introduit lors de notre analyse qui est un bon indicateur de la capacité d'absorption et du flux admissible au niveau des écrans d'eau, deux autres critères permettent d'évaluer les dimensions principales d'un four bouillon un combustible solide. Il y a un critère concernant la surface utile de la grille et un autre sur le volume du four qui est un indicateur du temps de séjour des gaz de combustion dans le four selon le critère concernant la grille [19], la charge calorifique au m^2 de surface utile de grille doit être comprise entre 500 000 et 900 000 kcal/ m^2 .h.

Donc la surface utile de la grille pour un four donné par :

$$A_G = \frac{\dot{m}_c * PCI}{2 \beta}$$

Elle devra être comprise donc entre :

$$A_{G1} = \frac{\dot{m}_c * PCI}{2 \beta_1} \text{ et } A_{G2} = \frac{\dot{m}_c * PCI}{2 \beta_2}$$

Avec :

$$\beta_1 = 500\,000 \text{ kcal/h et } \beta_2 = 900\,000 \text{ kcal/h}$$

ce qui donne

$$A_{G1} = 52 \text{ m}^2 \text{ et } A_{G2} = 29 \text{ m}^2$$

Le critère sur le volume, nous impose pour assurer un temps de séjour suffisant pour les gaz l'intérieur de la chambre de combustion, de choisir un facteur de charge volumique du four : $\gamma = \frac{\dot{m}_c * PCI}{V}$ entre 15 000 et 30 000 Btu/ ft^3 .h [16].

Comme nous avons deux fours, le volume de chacun doit donc être compris entre :

Exploitation des résultats

$$V_1 = \frac{\dot{m}_c * PCI}{\gamma_1} \text{ et } V_2 = \frac{\dot{m}_c * PCI}{\gamma_2}$$

Avec : $\gamma_1 = 15\,000 \text{ Btu/ft}^3 \cdot \text{h}$ et $\gamma_2 = 30\,000 \text{ Btu/ft}^3 \cdot \text{h}$

En tenant compte du facteur de conversion : $1 \text{ Btu/ft}^3 \cdot \text{h} = 10.343 \text{ w/m}^3$

Avec :

$$\dot{m}_c = \frac{20}{3.6} = 5.56 \text{ kg/s}$$
$$\text{et } PCI = 10\,805 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

On trouve :

$$V_1 = 194 \text{ m}^3 \text{ et } V_2 = 97 \text{ m}^3$$

En combinant ces deux valeurs avec les deux valeurs extrêmes de la surface utile de grille, la hauteur du four doit être comprise entre les deux valeurs limites :

$$H_{min} = 2 \text{ m et } H_{max} = 7 \text{ m}$$

Choisissons pour surface utile de la grille la valeur 40 m^2 à répartir sur une configuration rectangulaire avec une largeur de 4 m par laquelle on introduit le combustible et une longueur de 10 m le long de laquelle le combustible va évoluer jusqu'à la sortie du four. Si l'on convient que cette surface constitue la base de la chambre de combustion, et que l'on choisisse une hauteur de 3.5 m pour le four, son volume sera alors de $(40 * 3.5) = 140 \text{ m}^3$.

Calcul des conductances thermiques et des surfaces d'échange de chaleur

L'équation fondamentale régissant le transfert de chaleur dans un échangeur donne le flux de chaleur échangé entre le fluide chaud et le fluide froid par l'expression :

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

où:

A est la Surface d'échange en m^2

U, le coefficient d'échange de chaleur global en $\text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

ΔT_m , la différence de température moyenne logarithmique (corrigée lorsque l'échangeur n'est pas à contre-courant) (en $^\circ\text{C}$)

\dot{Q} étant le flux de chaleur échangé entre les deux fluides qui traversent l'échangeur (en kW).

Exploitation des résultats

Une très bonne approximation du coefficient d'échange global U pour les économiseurs, les tubes évaporateurs ou encore, d'une façon plus générale pour un échangeur gaz-liquide est donné par [16] :

$$U = (0.8 \text{ à } 0.9) h_o$$

où h_o est le coefficient de convection côté gaz.

Cette approximation est justifiée par le fait que dans ces échangeurs, les autres résistances thermiques sont négligeables devant la résistance à la convection du côté gaz.

Des valeurs typiques de ce coefficient sont données ci-dessous [16] :

Tableau IV-5 Valeurs typiques du coefficient de convection coté gaz

		Ecrans d'eau	Surchauf.	Evap	Econo	Préch. d'eau	Réch. d'air
h_o	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$	20	15	13	12	10	5

La différence de température moyenne logarithmique pour un échangeur de chaleur est donnée par l'expression :

$$\Delta T_m = F \cdot \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}}$$

Pour les écrans d'eau, le surchauffeur, l'évaporateur, l'économiseur et le préchauffeur d'eau, qui sont des échangeurs à contre-courant, on prendra :

$$F=1 \text{ et } U = 0.85 \cdot h_o.$$

Pour le réchauffeur d'air, on prend :

$$F = 0.85$$

Dans ce cas, l'échange de chaleur ayant lieu entre les fumées d'un côté et l'air de l'autre, les résistances thermiques à la convection côté air et côté fumées sont quasiment équivalentes et le coefficient d'échange global sera approximativement moitié de celui de l'économiseur. Nous prendrons pour ce coefficient la valeur de $5.2 \text{ } Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$.

Dans le tableau ci-dessous, les flux de chaleur sont notés \dot{E}_i et ont été extraits à partir du tableau utilisé pour le tracé des profils de température, et les différences de températures aux extrémités des différents échangeurs, nécessaires pour le calcul des différences de températures moyennes logarithmiques, sont obtenues directement à

Exploitation des résultats

partir des indications des températures sur les profils tracés ci-dessus. Les résultats des calculs concernant les conductances et les surfaces d'échange caractéristiques de chaque échangeur de la chaudière sont également portés au tableau ci-dessous :

Tableau IV-6 Résultats du calcul des conductances thermiques et des surfaces d'échange de chaleur

	\dot{E}_i (kJ/h)	ΔT_m (°C)	UA (W/°C)	U (Btu/h °F)	U (W/m ² K)	A (m ²)
Surchauffeur	21 949 200	459	13 282	12,75	72	183
Evaporateur	49 171 538	305	44 818	11,05	63	714
	58 310 362 (Ecrans)	646	25 063	17	97	260
Economiseur	34 796 160	141	68 784	10,2	58	1188
Réchauffeur d'air	9 823 004	102	26868	5,2	30	910
Préchauffeur d'eau	7 644 040	75	28439	8,5	48	589

Nous pouvons noter que le transfert d'énergie total à travers la chaudière se répartit comme suit :

- 32% au niveau des écrans d'eau, dont la surface d'échange d'après le tableau IV.6 ci-dessus est de 260 m² ;

- 27% dans l'évaporateur avec une surface de 714 m².

Le processus de vaporisation totalise ainsi à lui seul 59% du transfert d'énergie total dans la chaudière, avec une surface de 974 m².

- 19% dans l'économiseur qui nécessite la surface d'échange la plus importante, plus grande que celles des écrans d'eau, de l'évaporateur et du surchauffeur réunies.

- Environ 5% dans le préchauffeur et 5% dans le réchauffeur d'air, dont la surface est équivalente à celle qui correspond au processus de vaporisation dans son

Exploitation des résultats

ensemble où a lieu pourtant, rappelons-le, près de 60% de transfert d'énergie, soit 12 fois la quantité transférée dans le réchauffeur d'air. Ceci est la conséquence de la résistance thermique

élevée qui caractérise les transferts de chaleur gaz-gaz dans le réchauffeur d'air, mais également des écarts de température réduits au niveau des deux derniers échangeurs, et même au niveau de l'économiseur. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que ces trois échangeurs jouent un rôle déterminant pour l'amélioration des performances énergétiques de la chaudière, en allant puiser de l'énergie là où elle devient de plus en plus difficile à se laisser prendre, à des niveaux de température des fumées de plus en plus bas.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Nous devons réduire nos déchets à la source en limitant leur production et transformer ces détritiques en de nouvelles ressources grâce à leur valorisation énergétique.

Longtemps réputées pour leurs émissions polluantes, les usines d'incinération des ordures ménagères où seule la réduction des volumes de déchets était recherchée font peau neuve sous le nouveau nom de centres de valorisation énergétique régis par des normes environnementales très strictes et une maîtrise des flux énergétiques.

Dans le monde, ces centres connaissent un intérêt particulier de la part des collectivités pour la double fonctionnalité qu'elles ont : d'une part elles permettent d'éliminer les déchets ménagers, d'autre part elles permettent une valorisation énergétique (thermique et électrique) de ces derniers.

Au regard de la surconsommation de la société moderne qui s'accompagne d'une pénurie des matières premières et une production toujours plus importante des déchets ménagers, la valorisation des déchets ménagers apparaît comme la solution ultime de leur gestion, après en avoir effectué le tri.

Comme nous l'avons vu dans notre étude, pour que la valorisation énergétique soit efficace, il faut une bonne gestion des déchets, cela débutant par un tri sélectif qui permettrait le choix des déchets les plus combustibles et donc les plus à même d'être incinérés.

Au-delà du dimensionnement de notre chaudière, notre étude montre que les déchets d'une agglomération algérienne de 400 000 habitants permettraient de répondre aux besoins énergétiques d'une chaudière produisant 60 t/h de vapeur, soit l'équivalent des besoins en électricité domestique de 12,5% de sa population.

Ces seuls chiffres montrent tout l'intérêt qui devrait être porté dans notre pays à ce gisement inexploité d'énergie alternative.

Bibliographie

1. [En ligne] <http://www.paristechreview.com/2013/09/04/biomasse-dechets-mine-energie/>.
2. **CHENANE, Arezki.** *Analyse des coûts de la gestion des déchets ménagers en Algérie à travers la problématique des décharges publiques : Cas des communes de la wilaya de Tizi-Ouzou.* Tizi Ouzou : Faculté des sciences économiques et de gestion, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
3. [En ligne] <http://www.valtom63.fr/Valorisation-energetique.html>.
4. **LETERRIER, Stéphane.** Un pôle multi-filières de valorisation des déchets en Auvergne. *plateformesolutionsclimat*. [En ligne] SUEZ ENVIRONNEMENT, 17 février 2015. <http://www.plateformesolutionsclimat.org/solution/vernea-un-pole-multi-filieres-de-valorisation-des-dechets-au-coeur-de-lauvergne/>.
5. **Mayer, Nathalie.** *Valorisation énergétique des déchets*. s.l. : La Recherche et la direction scientifique de Total, Juillet 2013. n° 477.
6. and.dz. [En ligne] Agence Nationale des Déchets , 18 Janvier 2015. <http://and.dz/service-en-ligne-de-l-agence-nationale/k2-categories/documentations-et-infos-utiles-sur-dechets-algerie/decouvrir-les-dechets>.
7. **LOUDJANI, Fayçal.** *Guide des techniciens communaux pour les gestion des déchets ménagers et assimilés.* s.l. : Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), Annaba.
8. **DUONG, Frédéric.** La valorisation énergétique des déchets; un mode de traitement performant et propre. Salon internationale des énergies renouvelables - Oran : SUEZ ENVIRONNEMENT DIRECTION TECHNIQUE ET PERFORMANCE, 29 Octobre 2014.
9. **Caillat, Tudor Florea/Sébastien.** *Techniques de dépollution dans les applications industrielles de combustion.* Douai : s.n., Avril 2008.
10. **LEBEL, Florimonde.** *Etude des phénomènes de corrosion à haute température en environnement type UVED.* Université Henri Poincaré -Nancy I : s.n., 4 Mars 2008.
11. **Verwilghen, Cédric.** *Fixation des métaux lourds par des phosphates de calcium dans le traitement des fumées d'Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères.* Toulouse : s.n., 2006.
12. **DOUCE, Jean Yves LEGOUX et Catherine LE.** *L'incinération des déchets ménagers.* s.l. : Economica, 1995.
13. **P.Vesseron.** *Arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération*. Paris : Ministère de l'écologie et du développement durable, 2002.
14. **(ADEME), Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.** *Enquête sur les installations de traitements des déchets ménagers et assimilés en 2002 -Le traitement thermique version 3-*.

Bibliographie

15. **Européenne, Comission.** Document de référence sur les meilleures techniques disponibles ,incinération des déchets . Août 2006.
16. **V.Ganapathy.** *Industrial Boilers and Heat recovery steam generators,applications and calculations* . Abilene,Texas,USA : ABCO Industries, 2003.
17. **Galvez-Cloutier, Roza.** *Gestion intégrée des déchets solides et municipaux.* Université LAVAL : Faculté de Sciences: département de génie civil et génie des eaux , 2012.
18. **SHAPIRO, MICHAEL J MORAN & HOWARD N.** *Fundamentals of engineering thermodynamics* . America : Wiley, 2011.
19. **NUBER, K.** *Calcul thermique des chaudières.* Paris : DUNOD, 1972.

Annexes

Annexes

Tableau A-1: Constantes intervenant dans l'expression de la chaleur spécifique pour différents gaz

$\frac{C_p}{R} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4$					
	α	$\beta \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^6$	$\delta \cdot 10^9$	$\varepsilon \cdot 10^{12}$
CO ₂	2,401	8,735	-6,607	2,002	0
H ₂ O	4,070	-1,108	4,152	-2,964	0,807
SO ₂	3,267	5,324	0,684	-5,281	2,559
N ₂	3,675	-1,208	2,324	-0,632	-0,226
O ₂	3,626	-1,878	7,055	-6,764	2,156

Tableau A-2: Valeurs de la chaleur spécifique calculée pour l'air à différentes températures

T (°C)	C_{pa}	
	(kJ/kg K)	(Btu/lb °R)
25	1,012	0,242
80	1,016	0,243
100	1,018	0,243
120	1,02	0,244
140	1,023	0,244
160	1,026	0,245
180	1,029	0,246

Tableau A-3: Valeurs de la température de flamme adiabatique pour différents rapports d'air théorique α

α	T_c	
	(°F)	(°C)
1,5	1808,81	987,11
1,6	1740,94	949,41
1,7	1678,31	914,62

Annexes

Tableau A-4 : Résultats du calcul des températures des gaz pour $\alpha = 1,5$

$\alpha=1.5$	$\lambda = \frac{\dot{m}_c PCI}{A_P}$		40 000	50 000	60 000	70 000	80 000	90 000	100 000
$\dot{m}_c=19$ t/h	T1	(°C)	818	856	886	911	932	950	966
	T2		684	722	752	777	798	816	832
	T3		429	426	423	422	421	420	419
	T4		193	190	187	186	185	184	183
	T5		127	124	121	120	119	118	117
	T6		70	68	65	64	62	61	61
	qi (BTU/ft ² h)	13237	14961	16435	17741	18897	19930	20882	
$\dot{m}_c=20$ t/h	T1	(°C)	818	856	886	911	932	950	966
	T2		690	728	758	783	804	822	838
	T3		469	467	464	463	461	460	460
	T4		245	242	240	238	237	236	236
	T5		179	176	174	172	171	170	170
	T6		126	123	120	119	118	117	117
	qi (BTU/ft ² h)	13237	14961	16435	17741	18897	19930	20882	
$\dot{m}_c=21$ t/h	T1	(°C)	818	856	886	911	932	950	966
	T2		697	735	765	790	811	829	845
	T3		506	504	501	500	498	497	497
	T4		293	290	287	286	285	284	283
	T5		227	224	221	220	219	218	218
	T6		176	173	171	169	168	167	167
	qi (BTU/ft ² h)	13237	14961	16435	17741	18897	19930	20882	

Annexes

Tableau A-5: Résultats du calcul des températures des gaz pour $\alpha = 1,6$

$\alpha=1.60$	$\lambda = \frac{\dot{m}_c PCI}{A_p}$		40 000	50 000	60 000	70 000	80 000	90 000	100 000
$\dot{m}_c=19$ t/h	T1	°C	791	827	855	877	897	913	927
	T2		664	700	728	750	770	786	800
	T3		388	387	386	383	384	383	382
	T4		164	164	162	159	160	159	158
	T5		102	101	100	97	98	96	96
	T6		48	48	46	44	45	43	42
	qi (Btu/ft ² h)	12102	13631	14914	15982	17001	17849	18617	
$\dot{m}_c=20$ t/h	T1	°C	791	827	855	877	897	913	927
	T2		670	706	734	756	776	792	806
	T3		426	426	424	422	422	421	420
	T4		214	213	212	209	210	209	208
	T5		151	151	150	147	148	146	145
	T6		101	100	99	96	97	96	95
	qi (Btu/ft ² h)	12102	13631	14914	15982	17001	17849	18617	
$\dot{m}_c=21$ t/h	T1	°C	791	827	855	877	897	913	927
	T2		676	712	740	762	782	798	812
	T3		461	461	459	457	457	456	455
	T4		259	258	257	254	255	254	253
	T5		196	196	195	192	193	191	190
	T6		148	148	146	144	144	143	142
	qi (BTU/ft ² h)	12102	13631	14914	15982	17001	17849	18617	

Annexes

Tableau A-6: Résultats du calcul des températures des gaz pour $\alpha = 1,7$

$\alpha = 1,7$	$\lambda = \frac{\dot{m}_c PCI}{A_p}$	40000	50 000	60 000	70 000	80 000	90 000	100000	
$\dot{m}_c=19t/h$	T1	°C	766	798	824	844	862	876	889
	T2		645	677	703	723	741	755	768
	T3		354	351	351	349	349	347	348
	T4		142	139	139	136	137	135	135
	T5		83	80	79	77	78	76	76
	T6		32	29	29	26	27	25	25
	qi (Btu/ft ² h)	11116	12389	13499	14400	15248	15932	16588	
$\dot{m}_c=20t/h$	T1	°C	766	798	824	844	862	876	889
	T2		651	683	709	729	747	761	774
	T3		391	388	388	385	386	384	384
	T4		189	186	186	184	184	182	182
	T5		130	127	127	124	125	123	123
	T6		82	79	79	76	77	75	75
	qi (Btu/ft ² h)	11116	12389	13499	14400	15248	15932	16588	
$\dot{m}_c=21 t/h$	T1	°C	766	798	824	844	862	876	889
	T2		657	689	715	735	753	767	780
	T3		424	421	421	419	419	417	417
	T4		232	229	229	226	227	225	225
	T5		173	170	169	167	168	166	166
	T6		127	124	124	121	122	120	120
	qi (Btu/ft ² h)	11116	12389	13499	14400	15248	15932	16588	

Annexes

Tableau A-7: Valeurs de la chaleur spécifique des gaz de combustion à différentes températures

Echangeur de chaleur	Intervalle de température	T (moyenne)	C_{pg}	
		(°C)	(kJ/kg K)	(Btu/lb °R)
Ecrans d'eau	T_c-T_1	950	1,244	0,297
Surchauffeur	T_1-T_2	800	1,209	0,289
Evaporateur	T_2-T_3	600	1,164	0,278
Economiseur	T_3-T_4	350	1,088	0,260
Réchauffeur d'air	T_4-T_5	200	1,030	0,246
Préchauffeur d'eau	T_5-T_6	150	1,010	0,241

Tableau A-8: Evolution du rendement de la chaudière en fonction de la température de l'air à l'entrée de la chambre de combustion

Ta	(°C)	80	100	120	140	160	180
T1		820	827	834	840	847	854
T2		699	706	713	719	726	733
T3		411	426	440	453	468	483
T4		199	213	228	241	255	270
T5		152	151	148	145	143	142
T6		102	100	98	94	93	91
Tc		938	949	961	972	983	994
η_{PCS}		84	84	84	84	85	85
η_{PCI}	95	95	95	95	95	95	