

N° d'ordre :

Année 2005



Laboratoire de
Physique et de
Chimie de
l'Environnement
LPCE

01 87 20 00 Ouagadougou (D)
04 : +226 20 39 38 15
+226 20 28 78 13
Fax : +226 20 39 33 37
e-mail : jean.koulidiati@univ-ouaga.bf

Unité de Formation et de Recherches / Sciences Exactes et Appliquées
(UFR/SEA)

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU

Mention : Physique

Présentée par : **Jean Fidèle NZIHOU**

-----♣-----
« **Modélisation d'un four thermique rotatif : Influence des paramètres de
fonctionnement sur la performance thermique et les émissions polluantes en
incinérateur** ».
-----♣-----

Directeur de thèse : Pr. B. Gérard SEGDA

-----♣-----
Soutenue publiquement le 17 novembre 2005 devant la commission d'examen
-----♣-----

JURY

M. Pierre JOULAIN Directeur de Recherches, CNRS, Poitiers, France

Président

M. Yann ROGAUME

Maître de Conférences ENSTIB-Epinal (France)

Rapporteur

M. Z. KOALAGA

Maître de Conf. Université de Ouagadougou (B.- Faso)

Rapporteur

M. Jean KOULIDIATI

Professeur Université de Ouagadougou

Examineur

M. J. Claude GOUDEAU

Professeur Associé Université de Ouagadougou

Examineur

M. François. ZOUGMORE

Maître de Conférences Université de Ouagadougou

Examineur

M. B. Gérard. SEGDA

Maître de Conférences Université de Ouagadougou

Examineur

M. J.D. BATHIEBO

Maître de Conférences Université de Ouagadougou

Examineur

M. Betaboalé NAON

Maître-Assistant U. P. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Invité

Résumé

Face à l'accroissement des quantités des déchets et la venue de normes environnementales de plus en plus strictes, l'incinération des déchets se trouve être l'un des moyens de traitement de déchets les plus utilisés.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons d'abord proposé un déchet modèle simple représentatif pour la ville de Ouagadougou. Nous avons ensuite étudié la combustion de ce déchet modèle dans un four rotatif pilote de laboratoire. La combustion du bois, du carton et du plastique, seul ou en mélange dans les proportions du déchet modèle a été étudiée. Ont été examinés les effets de :

- la vitesse de rotation
- la charge dans le four
- l'excès d'air.

Un choix judicieux de la charge dans le four et de la vitesse de rotation ont permis d'obtenir des rendements de combustion optimaux et une réduction des émissions polluantes.

Une étude bidimensionnelle du transport de masse et des échanges d'énergie dans la chambre de combustion a été faite.

Mots clés :

- Déchet
- Bois, carton, plastique
- Modèle
- Incinération
- Température
- Emissions gazeuses
- Vitesse de rotation.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE) de l'Université de Ouagadougou, dirigé par M. Jean KOULIDIATI, Professeur Titulaire, à qui j'exprime ma profonde gratitude, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et pour avoir accepté de juger cette thèse.

Mes remerciements vont ensuite à Monsieur Bila Gérard SEGDA, Maître de Conférences, qui a bien voulu superviser mes travaux de recherche et juger cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

A Monsieur P. JOULAIN, Directeur de Recherches au CNRS de Poitiers (France), j'exprime ma gratitude pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury.

A MM. Yann ROGAUME, Betaboalé NAON, Zacharie KOALAGA ; respectivement Maître de Conférences à l'ENSTIB-Epinal (France), Maître Assistant à l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) et Maître de conférence à l'Université de Ouagadougou (Burkina Faso) qui malgré leurs occupations, ont accepté de rapporter cette thèse, j'exprime ma considération.

Que MM. Jean Clause GOUDEAU, Professeur associé; François ZOUGMORE, Maître de conférences; Joseph Désiré BATHHIEBO, Maître de conférences à l'Université de Ouagadougou; trouvent ici l'expression de ma gratitude, pour leur disponibilité à juger ce travail.

Je tiens à exprimer également ma reconnaissance à Monsieur Moussa SOUGOTI, Maître-Assistant à l'université de Ouagadougou pour sa disponibilité tout au long de nos recherches et son implication dans la mise en œuvre des expériences.

Mes remerciements vont ensuite à MM. Médard BOUDA et Salou HAMIDOU, pour leur précieuse collaboration au sein de l'équipe de recherche, ainsi qu'aux autres membres de l'Ecole Doctorale de Physique de l'Université de Ouagadougou.

Je remercie Madame Josiane BOUDA, le Dr Pétronille KAFANDO et Monsieur Pierre SANON, pour leurs précieuses contributions à la réalisation de ce travail.

Que mon épouse Ramata trouve dans ce modeste document le fruit de ses privations et le résultat de tout le temps qu'elle a passé seule à attendre mon retour.

Remerciements 1

INTRODUCTION	9
CHAPITRE I : PRESENTATION DU SUJET ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	11
1.1. Introduction	11
1.2. Les déchets: définitions, typologie et production.....	11
1.2.1. Définitions :	11
1.2.2. Typologie des déchets.	12
1.2.3. Production.....	14
1.3. Les modes de valorisation, traitement et stockage des déchets.....	16
1.3.1. La Valorisation matière	16
1.3.2. La valorisation énergétique	19
1.3.3. Traitement.....	19
1.4. Les fours rotatifs.....	24
1.5. Les fours à grilles mobiles.....	28
1.6. Les fours à lis fluidisés	30
1.7. Diagnostic énergétique d'un four thermique	31
1.7.1. Rappel de lois générales de la combustion.	32
A . Combustions réalisées dans les chaudières.....	32
A .1 Combustion neutre ou stœchiométrique.....	32
A . 2. Combustion oxydante.....	33
A . 3. Combustion réductrice.	33
A . 4. Combustion mixte.	34
B . Equilibre CO et H ₂ dans les fumées.	34
C. Equations de la combustion pour les fumées non hydrogénées.....	35
D. Equations de la combustion pour les fumées hydrogénées.....	36
E. Le rendement de combustion.....	37
F. Principe et utilisation des diagrammes d'Oswald.....	37
F.1. Diagramme d'Oswald informatisé pour fumées non hydrogénées....	37
F . 2. Diagramme d'Oswald pour les fumées hydrogénées.	40

1.7.2 Modèles des fours rotatifs.....	40
A. La technologie du four rotatif.....	41
A.1. Le fours co-courant et contre-courant:.....	41
A.2. Le four rocking:.....	43
A.3. Les fours slagging et ashing :.....	43
B. Section longitudinale du four.....	43
C. La chambre de post combustion.....	44
1.7.3. Les régimes de fonctionnement d'un four rotatif.....	45
1.7.4. Temps de séjour des solides dans un four rotatif.....	46
1.7.4 Les modèles de transfert de masse dans un four rotatif.....	47
1.8. Conclusion.....	48
CHAPITRE 2 : MODELE DE LA FRACTION COMBUSTIBLE DU DECHET MENAGER DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU.....	49
2.1. Introduction.....	49
2.2. Le modèle.....	49
2.3. Composition élémentaire de la fraction combustible du déchet modèle:	53
2.3.1. Composition élémentaire du bois.....	53
2.3.2. Composition élémentaire du carton	55
2.3.3. Composition élémentaire du PET	55
2.4. Formule brute approchée de la fraction combustible du déchet modèle de la ville de ouagadougou.	56
2.5. Conclusion.....	58
CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL	59
3.1. Introduction.....	59
3.2. Description du four thermique rotatif.....	59
3. 2. 1. La chambre de combustion :	61
3. 2. 2. La chambre de postcombustion.....	64
3. 2. 3. La cheminée.....	65
3. 2. 4. Le boîtier de commande	66
3. 3. Les thermocouples et le boîtier de centralisation.....	67

3.4. L'analyseur des gaz de combustion	67
3. 4. Le PC d'acquisition et le logiciel Testpoint.....	68
3. 4.1. Le PC d'acquisition.....	68
3. 4.2. Le logiciel Testpoint	68
A. Présentation	68
B. Fonctionnalités.....	69
B.1. Contrôle d'un instrument.....	69
B.2. Acquisition des données.	69
B.3. Analyse.	69
B.4. Présentation et comptes rendus.....	69
B.5. Interface utilisateur.	70
B.6. Echange dynamique de données/Liaison objet et inclusion.....	70
C. Utilisation de Testpoint.....	70
3.5. Le dispositif de mesure du PCI.....	72
CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS OBTENUS.....	76
4.1. Introduction	76
4.2. Etude de l'influence de la vitesse de rotation	76
4.2.1. Calibrage des vitesses de rotation.	76
4.2.2. Résultats des mesures.....	76
4.3. Etude de l'effet de la charge.....	81
Expression de la masse en fonction du taux de remplissage du four.....	90
4.4. Etude de l'influence de l'excès d'air.....	92
4.5. Efficacité de combustion	95
4.6. Analyse synthétiques des effets des paramètres sur la température et les émissions gazeuses.	97
4.7. Schéma de la combustion du déchet ménager.....	99
4.7.1. Combustion du bois seul	99
4.7.2. Combustion du carton seul.....	101
4.7.3. Combustion du déchet modèle	103

CHAPITRE 5 : ANALYSE THERMIQUE ET MODELISATION DE LA COMBUSTION DES	
DECHETS.	107
5.1. Introduction	107
5.2. Modèles de transfert dans le four rotatif.....	108
5.2.1. Définition:.....	108
5.2.2. Position du problème.....	108
5.3. Le modèle de transport.....	113
5.3.1. Transfert de masse du lit solide.....	113
5.3.2. Transfert de masse du gaz au travers du lit solide.	114
5.3.3. Transfert de masse du gaz dans l'espace libre :	115
A. Notion de couche limite cinématique.....	115
B. Equations de transport en convection forcée.....	117
B.1) La loi de la conservation de la matière.....	117
B.2) Le second principe de la dynamique newtonienne... ..	118
5.4. Modèle thermodynamique du four	123
A. Le taux de transfert de chaleur par le gaz vers la paroi réfractaire et le lit	
solide par unité de longueur du four.....	126
B. Le taux de transfert de chaleur par le gaz et la paroi réfractaire vers le lit	
solide par unité de longueur du four.....	126
C. Energie dissipée vers l'extérieur.....	127
D. Transfert convectif d'énergie	127
D. Transfert d'énergie par rayonnement	128
D.1. Facteur de forme :.....	131
E. Bilan global des échanges d'énergies dans la chambre de combustion.	132
5.5. Combustion avec le modèle CSTR appliqué au déchet.....	136
5.5.1. Zone d'entrée :.....	136
5.5.2. Zone de combustion	137
5.6. Modèle chimique	140
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	141

ANNEXES 142

Annexe n°1 : quelques considérations de coût du traitement des déchets..... 142

Annexe n°2 : Fonctionnement de l'analyseur de gaz Testotherm..... 143

Annexe n°3 : Principe des thermocouples..... 145

Annexe n°4 : Le programme d'acquisition du four rotatif avec Testpoint. 148

Annexe n°5 : Loi de Planck. 148

Annexe n°5 : Loi de Planck. 149

Annexe n°5 : Loi de Planck. 150

Annexe n°6 : facteurs de forme gris 154

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 157

NOMENCLATURELettres latines :

C	concentration du combustible	
C _p	chaleur massique à pression constante	(J/kg/K)
D	diamètre	
-e	= d (%)	défaut d'air
+e	= e (%)	excès d'air
k	constante d'équilibre	
L	longueur	
m' _g	débit massique du gaz	
m' _s	débit massique du solide	
N	ordre de réaction	
[O ₂]	concentration d'oxygène	
P	poids	
q	énergie (J)	
Q	chaleur de la combustion	(J/kg)
Q ⁺	chaleur entrant dans le volume de contrôle	
Q ⁻	chaleur sortie du volume de contrôle	
T	température (K)	
T _s	temps de séjour	
V	volume	
Z	ration volume hydrogène sur volume CO.	

Lettres grecques :

α'	défaut d'air	(%)
β'	excès d'air	(%)
ε_f	émisivité	
λ	conductivité thermique	
μ	viscosité dynamique	(kg.s ⁻¹ .m)
τ	taux de remplissage	
σ_{ii}	composante normale de la pression des forces visqueuses	
φ	flux d'énergie	
δ	épaisseur de la couche limite cinématique (m)	
θ	angle	(rad)
η	rendement	(%)
η_c	efficacité de combustion (%)	
ρ	masse volumique (kg/m ³)	
Ω	angle solide	
ω	production d'énergie	
ω	vitesse de rotation	
ω'	pourcentage d'oxygène (%)	
ν	fréquence (Hz)	
Σ	production d'énergie	
\mathcal{G}_{H_2O}	proportion de vapeur d'eau	

INTRODUCTION

Le développement humain s'accompagne d'une plus grande utilisation et d'une plus grande production des biens et de l'énergie. Ces biens sont présentés aux consommateurs dans des emballages divers qui après usage peuvent devenir inutiles. Ces mêmes biens ne sont pas toujours consommés en totalité et les restes sont rejetés. La production de l'énergie ainsi que les activités industrielles et commerciales génèrent aussi des sous produits non désirés ou inutilisables. Ils deviennent donc des déchets dont les quantités vont croissantes.

La nature a une certaine capacité de résorption des déchets naturels, surtout les déchets biologiques dits biodégradables. Mais la civilisation moderne produit et consomme beaucoup de produits artificiels comme les matières plastiques non dégradables par la nature. Ces produits exigent donc des traitements appropriés pour leur élimination.

Parmi les méthodes d'élimination des déchets, nous avons l'incinération dans des fours thermiques. Cette méthode d'élimination connaît un intérêt croissant en raison de la venue des normes de plus en plus strictes qui pénalisent les méthodes traditionnelles notamment l'enfouissement simple des déchets. Toutefois, cette méthode nécessite des investissements importants et des coûts de fonctionnement élevés.

Le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE) mène depuis quelques années, des recherches fondamentales et appliquées sur les déchets. Des campagnes de caractérisation ont ainsi été réalisées en vue de contribuer à l'amélioration de la gestion des déchets au Burkina Faso.

Il ne suffit pas de pouvoir mettre en place un système de traitement des déchets. Il faut aussi veiller à ce que ce système de traitement ne soit pas une source de nuisances et ne conduise pas à un transfert de pollution. Une bonne conception du système de traitement des déchets à mettre en place nécessite de bien en connaître le fonctionnement et les paramètres qui l'affectent.

Les unités de traitement des ordures ménagères de dimensions industrielles, ne permettent pas de conduire des recherches sur les paramètres de la combustion, les

recherches fondamentales se font sur des prototypes de laboratoire pour des raisons évidentes de coût.

Le présent travail est donc consacré à l'incinération des constituants des déchets ménagers : cartons, bois, plastiques, étudiés en mélange sur la base du déchet modèle de la ville de Ouagadougou. Cette incinération est faite sur un four pilote expérimental qui a été modélisé afin d'optimiser ses paramètres de fonctionnement et donc ses performances.

Dans cette optique, nous avons instrumenté un four thermique rotatif et particulièrement étudié la vitesse de rotation, le taux de remplissage, et le débit d'air.

Dans le premier chapitre du mémoire, nous présentons le sujet et une étude bibliographique. Une synthèse de l'évolution des techniques de traitement des déchets précède la synthèse des études déjà faites sur la combustion des déchets solides et la formation des oxydes d'azote.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du déchet de Ouagadougou qui sera utilisé dans tout ce travail. Le modèle est basé sur les campagnes de caractérisation des déchets de Ouagadougou effectuées par le LPCE.

Le dispositif expérimental est décrit au chapitre 3. Il est essentiellement constitué d'un cylindre légèrement en pente auquel sont adjoints une chambre de post combustion ainsi que les dispositifs de commande, d'acquisition des températures par thermocouples et d'analyse des gaz.

Dans le chapitre 4, nous présentons les résultats de nos mesures. Nous y étudions l'influence de la vitesse de rotation, le taux de charge et l'excès d'air sur la performance thermique et les émissions des NO_x, CO₂, CO

Enfin le chapitre 5 analyse les résultats expérimentaux et est consacré à la modélisation des différents modèles. Les résultats de cette étude nous permettent de déterminer les paramètres optimaux de fonctionnement du four rotatif, afin de réduire les émissions polluantes.

Chapitre 1 : Présentation du sujet et étude bibliographique

1.1. Introduction

Dans ce chapitre introductif, nous donnerons dans un premier temps les définitions, les typologies et les modes de traitements qui leur sont appliqués aux déchets. Ensuite un survol sera fait sur les études des fours rotatifs.

1.2. Les déchets: définitions, typologie et production.

1.2.1. Définitions :

Il existe plusieurs définitions des déchets. La notion de déchet est même variable suivant les pays et les législations. Ainsi, La loi française [1] définit-elle le déchet comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

Le code de l'environnement du Burkina Faso [2] définit les déchets urbains comme « Des détritiques solides, liquides ou gazeux en provenance des maisons d'habitation et assimilés, des immeubles administratifs, des salles de spectacles, de restauration et de tout autre établissement recevant du public. Sont assimilés à des maison d'habitation les casernes et les écoles ».

Sont compris dans la dénomination « déchets urbains » :

- Les ordures ménagères, les cendres, les débris de verre ou de vaisselle, les emballages plastiques, les feuilles, les balayures et résidus de toute sorte déposés dans les récipients individuels ou collectifs placés devant les maisons ou sur la voie publique, les eaux usées domestiques, les excréta.

- Les déchets non industriels, les déchets assimilés à des déchets urbains des établissements industriels, les déchets des établissements commerciaux, bureaux, cours et jardins privés, déposés dans des récipients, dans les mêmes conditions que les ordures ménagères.
- Les crottins, lisiers, fumiers, feuilles mortes, boues, et d'une façon générale, tous les produits provenant du nettoyage des voies publiques, voies privées abandonnées au balayage, jardins publics, parcs, cimetières et leurs dépendances, rassemblés en vue de leur évacuation.
- Les produits du nettoyage et détritrus des halles, foires, marchés, lieux des fêtes publiques, lieux d'attache des bêtes de somme ou de trait, rassemblés en vue de leur évacuation.
- Les résidus en provenance des écoles, casernes, hospices, prisons et tout bâtiment public, groupés sur des emplacements déterminés, dans des récipients appropriés, les résidus non toxiques et non dangereux des formations sanitaires et assimilés.
- Le cas échéant, tous les objets abandonnés sur les lieux, places et voies publiques, ainsi que les cadavres d'animaux.

1.2.2. Typologie des déchets.

On distingue plusieurs types de déchets selon leur origine ou leur dangerosité.

On classe ainsi les déchets en :

- Déchets municipaux : ensemble des déchets dont l'élimination (au sens donné par les textes législatifs) relève de la compétence des communes. On y trouve les catégories suivantes:
 - Les ordures ménagères : déchets issus de l'activité domestique des ménages et pris en compte par les collectes usuelles ou séparatives.
 - Les déchets encombrants des ménages : déchets provenant de l'activité domestique des ménages qui, en raison de leur volume ou de leur poids, ne peuvent être pris en compte par la collecte usuelle des ordures ménagères et nécessite un mode de gestion particulier. Ils

comprennent notamment : les biens d'équipement ménagers usagés, les déblais, les gravats, les déchets verts des ménages. Il s'agit le plus souvent de déchets occasionnels.

- Les déchets dangereux des ménages : déchets provenant de l'activité des ménages qui ne peuvent être pris en compte par la collecte usuelle des ordures ménagères, sans créer de risques pour les personnes ou pour l'environnement. Ces déchets peuvent être explosifs, corrosifs (acides), nocifs, toxiques, irritants (ammoniaque, résines), comburants (chlorates), facilement inflammables, ou d'une façon générale dommageables pour l'environnement.
- Les déchets du nettoyage : déchets provenant du balayage des rues et autres espaces publics ou du vidange des corbeilles disposées sur les voies publiques. Ils comprennent notamment les déchets des marchés et des plages.
- Les déchets de l'assainissement collectif : déchets résultant du fonctionnement des dispositifs d'épuration et de l'entretien des réseaux d'évacuation des eaux usées et pluviales.
- Les déchets verts des collectivités locales : matières végétales issues de l'exploitation, de l'entretien ou de la création de jardins ou d'espaces verts publics et privés ainsi que les déchets organiques des activités horticoles professionnelles ou municipales, à l'exception des supports de culture.
- Les déchets industriels banals (DIB): déchets résultant d'une activité industrielle et qui ne sont ni toxiques, ni dangereux. Les DIB sont constitués de bois, papiers, cartons, plastiques, verre, caoutchouc, textile, cuir ou de matières organiques. On peut les assimiler aux ordures ménagères.
- Les déchets industriels spéciaux [3]: Les déchets ... figurant en raison de leurs propriétés dangereuses sur une liste fixée par décret en Conseil des Ministres, ne peuvent pas être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres catégories de déchets.

- Les déchets hospitaliers qui du fait de la présence éventuelle des agents pathogènes font l'objet d'un traitement particulier.
- Les déchets agricoles.

On doit aussi signaler les nouvelles qualifications des déchets avec la loi française du 13 juillet 1992 et les directives récentes :

- Les déchets ultimes [4] : "Est ultime ... un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux." .
- Les déchets inertes [5]: « 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 autre 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 ».

1.2.3. Production

La production des déchets est variable suivant la zone géographique, la saison et les activités artisanales, commerciales et industrielles du territoire considéré. On note donc des disparités dans la production des déchets entre les pays occidentaux et les pays en voie de développement d'une part.

En France, la production annuelle des déchets urbains était de [6] 23,6 Millions de tonnes, dont 18 millions d'ordures ménagères en 1986. Au niveau mondial, ANRED [7] avait fait les évaluations du tableau suivant.

Tableau 1 : Production mondiale de déchets en 1992.

Pays	Déchets municipaux (En milliers de tonnes)	Population (En milliers d'habitants)	Ratio kg/hab/an
Amérique du Nord	225 160	267 910	840
□ Canada	16 400	26 240	625
□ Etats Unis	208 760	241 670	864
Europe	115 671	378 710	305
Japon – Australie - Nlle Zélande - Afrique du sud	48 280	122 000	396
□ Japon	48280	122 000	396
URSS Europe Centrale	85 630	411 670	208
□ URSS	55 000	280 140	196
Amérique Latine	102 194	444 550	230
Afrique du Nord – Moyen Orient	23 548	212 400	111
Afrique	28 365	458 590	62
Chine	118 029	1 139 000	104
Asie – Océanie	114 258	1 711 780	67
Total	861 135	5 146 610	167

Le tableau ci-dessous résume quelques caractéristiques sur la production des déchets à Ouagadougou en 1995[8]

Tableau 2 : Production des déchets à Ouagadougou en 1995.

Production spécifique / personne / jour	0.65 kg
Densité moyenne	0.63 T/m ³
Production d'OM annuelle	200 000 T
Production d'OM annuelle	300 000 m ³
Production de déchets hospitaliers annuelle	350 T

1.3. Les modes de valorisation, traitement et stockage des déchets.

1.3.1. La Valorisation matière

Le but est ici de trouver une nouvelle utilisation tel quel ou modifié du déchet. On distingue alors :

- **Le réemploi**

on emploie un déchet pour un usage analogue à son premier emploi. C'est par exemple le réemploi de bouteilles consignées.

- **La réutilisation**

on emploie un déchet pour un usage différent de son premier emploi. Au Burkina Faso par exemple, les bouteilles d'eau minérale et des sucreries sont réemployées dans le secteur informel pour mettre les boissons locales, les métaux sont ré-utilisés dans l'artisanat, etc.

- **La régénération**

par un procédé physique ou chimique, on redonne au déchet des caractéristiques qui lui permettent de remplacer une matière première neuve. On peut par exemple filtrer le déchet s'il est liquide. La régénération est par exemple utilisée pour la récupération des huiles usagées.

- **Le recyclage**

on obtient à partir de déchets, des matières premières entrant dans la fabrication de nouveaux produits. Au Burkina Faso, on ne trouve que peu de déchets métalliques dans les déchets municipaux. Ils sont déjà récupérés en amont dans les poubelles, les bacs à ordures ou les centres de transfert. Au niveau d'une communauté, c'est dans un **Centre de Tri** que se fait le recyclage des déchets. On y utilise des procédés manuels et mécaniques pour extraire la fraction valorisable des déchets qui y sont acheminés. Le schéma d'un centre de tri de Savoie, en France [9] est donné sur la figure ci-dessous :

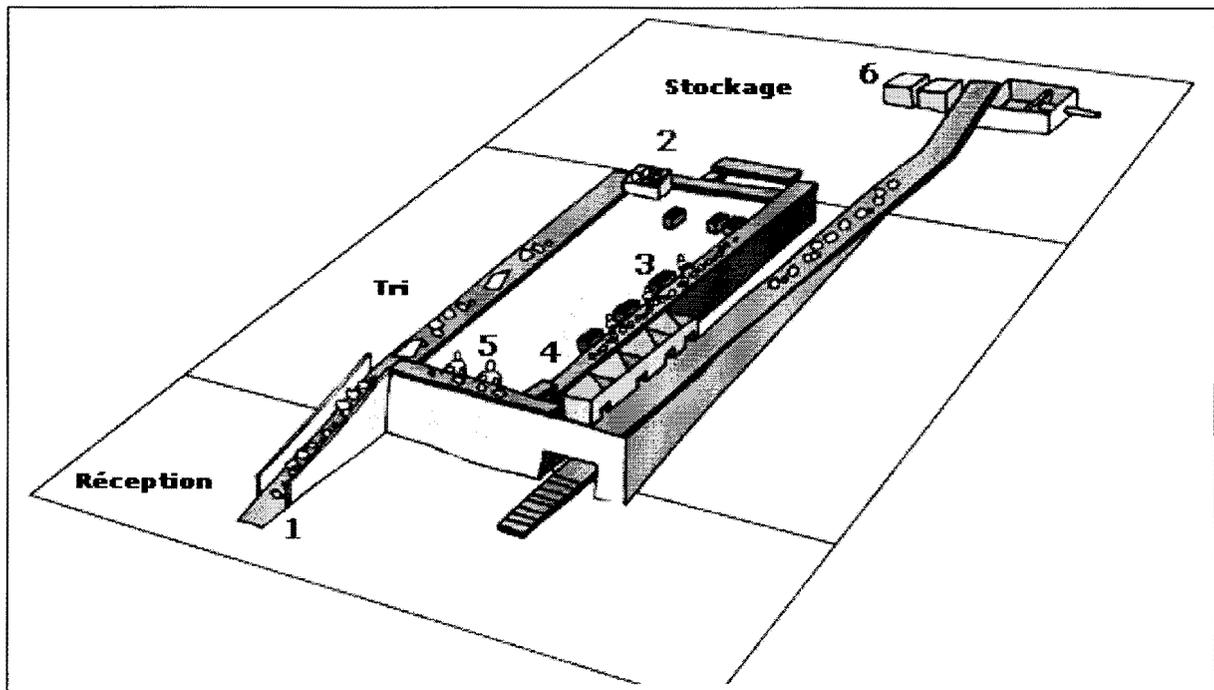


Figure 1 : Schéma de l'un des trois centres de tri des déchets de Savoie (France).

1. Des **aires de réception** spécifiques reçoivent chaque type de déchets : journaux-revues, papiers-cartons, emballages. Les opérations de tri se succèdent ensuite sur plusieurs tables.
2. Un **pré-tri** est effectué par élimination des gros refus et extraction des gros cartons.
3. Sur la **table de tri** principale sont récupérés les bouteilles en plastique, les papiers, les briques alimentaires et les journaux-revues.
4. Un **tapis à aimant** permet d'attirer les métaux ferreux et de les récupérer.
5. Un **dernier tapis** permet de trier l'aluminium. Il permet également d'assurer un contrôle de qualité.
6. Les déchets sont ensuite **conditionnés en balles et stockés**. Les refus de tri (déchets non recyclables, mal triés à la base par l'habitant) seront incinérés.

Les déchets ainsi conditionnés sont dirigés vers les filières de valorisation qui consiste à les utiliser à la production d'autres produits utilisables.

Le compostage et la méthanisation sont deux exemples de valorisation des déchets. Ce sont des procédés biologiques qui s'appliquent à la plupart des déchets organiques, notamment les déchets végétaux, la fraction fermentescible des ordures ménagères ou les boues de station d'épuration.

- **Le compostage** est un procédé de décomposition de la matière organique en présence d'air et sous l'action de micro-organismes naturellement présents dans les déchets. On obtient un produit stabilisé et fertilisant utilisable en agriculture : le compost.

- **La méthanisation** est une décomposition de la matière organique en absence d'air. Le procédé est applicable aux déjections animales. Dans une ferme d'élevage, la grande quantité d'excrétas permet d'obtenir des quantités de biogaz appréciables et utilisables comme combustible. Le biogaz, tout comme le gaz naturel est un mélange gazeux dont le principal composant est le méthane en voici la composition moyenne :

Tableau 3 : Composition chimique moyenne du biogaz (source Solagro France)

Méthane (CH₄)	40-70%
Gaz carbonique (CO₂)	30 à 50%
Hydrogène sulfuré (H₂S)	0.1 à 0.5%

Il est saturé en eau et sa valeur énergétique dépend de sa teneur en méthane. Il est très corrosif à cause de la présence simultanée du sulfure d'hydrogène (H₂S) et d'eau.

- **L'épandage** est la valorisation de matières organiques non toxiques et non pathogènes qui présentent un intérêt agronomique pour la fertilisation, l'amendement des sols ou un intérêt nutritionnel. Il peut être direct ou se faire après une phase d'hygiénisation et de stabilisation (compostage, traitement à la chaux...).

1.3.2. La valorisation énergétique

Ici on utilise les déchets dont la valeur énergétique le permet, à la production de l'énergie sous forme de chaleur ou de l'électricité. Un facteur clé est le pouvoir calorifique inférieur du déchet considéré. L'incinération est la combustion de la fraction combustible des déchets. On utilise des échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur d'eau sous pression qui peut actionner des générateurs électriques. La chaleur peut être directement utilisée dans les processus de production industrielle. C'est ainsi que l'incinération en cimenterie de certains Déchets Industriels Banals (D.I.B.) ou Déchets Industriels Spéciaux (D.I.S.) à haut Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) est une valorisation énergétique directe de ces déchets en substitution d'énergie noble.

1.3.3. Traitement

Les opérations de traitement permettent de réduire le potentiel polluant ou le volume des déchets avant stockage. Il y a des procédés physiques, chimiques ou biologiques.

• Traitements physico-chimiques

Ils dépendent de la composition du déchet et peuvent être de natures diverses :

- la neutralisation par une solution acide pour les bases et une solution basique pour les acides ;
- la décyanuration par oxydation des cyanures en cyanates moins toxiques;
- la déchromatation par réduction du chrome hexavalent en chrome trivalent moins toxique et précipitable sous forme insoluble ;
- la précipitation des métaux lourds en hydroxydes métalliques insolubles ;
- l'échange d'ions pour fixer les éléments indésirables du déchet et concentrer ainsi la pollution dans un faible volume ;
- le cassage d'émulsion effectué à haute température pour séparer la phase aqueuse et la phase liquide incinérable.

➤ **L'incinération** : les déchets sont brûlés dans des fours de grande capacité (une à plusieurs dizaines de tonnes par heure). Elle a pour but de réduire la masse des déchets (jusqu'à 75%) et leur volume (jusqu'à 90%). Elle engendre des sous-produits tant solides que gazeux. Les résidus solides comprennent les mâchefers et les cendres volantes. Les gaz issus de la combustion contiennent des oxydes d'azote, de carbone et des dérivés chlorés et sulfurés. Rejetés tels quels dans l'atmosphère ce sont de polluants redoutables à l'origine de sérieuses pollutions atmosphériques. Les législations en matière de traitement des déchets font donc normalement obligation aux exploitants des unités d'incinération des déchets, de procéder au traitement de ces émanations gazeuses avant leur rejet dans l'atmosphère. Mais ces traitements produisent eux même des sous produits appelés REFIOM (Résidus d'Épuration des Fumées de l'Incinération des Ordures Ménagères) ou REFIDI (Résidus d'Épuration des Fumées de l'Incinération des Déchets Industriels).

✓ Les émanations gazeuses sont soit filtrées pour capter les dioxines et les métaux lourds, soit lavées pour les transformer en liquide. On peut ensuite précipiter les composés présents dans le liquide ou les neutraliser par des solutions chimiques appropriées. Les dioxines sont devenues célèbres suite aux accidents dans les usines de production des dérivés organochlorés, dont le plus connu est l'accident de Seveso (Italie) en juillet 1976. Les dioxines sont aujourd'hui sujettes à de nombreux débats. N'étant pas dégradables par la nature, leur durée de vie est presque illimitée. Elles persistent donc et peuvent se retrouver dans l'organisme humain soit par inhalation, soit par l'alimentation au travers des végétaux ou animaux eux mêmes contaminés. Certaines peuvent être cancérogènes soit par accumulation, soit par interaction avec le matériel génétique.

✓ Les cendres volantes constituent un danger important pour l'environnement, notamment pour les sols et nappes phréatiques. Elles sont constituées de particules de taille inférieure à 75 μ m et sont entraînées par le courant gazeux [10]. Elles doivent leur caractère dangereux à la forte teneur en métaux lourds toxiques et solubles, ainsi qu'en sels solubles et, dans une moindre proportion, en composés organiques provenant d'une combustion incomplète [11].

- ✓ Les mâchefers sont des résidus de combustions composés de la fraction incombustible des déchets: verre, gravats,... Ils contiennent parfois des métaux lourds, mais sont moins toxiques que les cendres volantes. On peut les valoriser dans les travaux publics, notamment pour la pavage des routes et les remblais de plate forme, mais leur utilisation en France est strictement réglementée. Les mâchefers qui ne peuvent être valorisées ou mélangées aux cendres volantes sont stockées en centre d'enfouissement technique (CET).
- ✓ Les résidus liquides sont constitués entre autres de l'eau provenant du refroidissement des mâchefers. Suivant la composition initiale des déchets incinérés, cette eau peut se charger de différents éléments toxiques tels que les sels métalliques de soufre, de fluor, de chrome, de cuivre, de nickel, de zinc, de cadmium, de plomb ou encore de mercure. Le procédé « humide » de neutralisation des gaz acides présents dans les fumées utilise aussi de l'eau. Les gaz sont lavés par une solution aqueuse puis l'effluent liquide obtenu est traité. La phase liquide est ensuite neutralisée puis rejetée.

Le traitement des déchets spéciaux est réalisé dans des unités spécialisées à haute température avec traitement des fumées et captation des poussières. Elle concerne la plupart des déchets organiques (solvants, hydrocarbures, vernis...). Il existe plusieurs filières en fonction des caractéristiques du déchet et notamment de sa teneur en éléments halogénés.

La destruction de ces déchets dans les fours de cimenterie est non polluante du fait des températures de combustion (1450°C), du temps de séjour des gaz de l'ordre de plusieurs secondes, des conditions oxydantes et de la réintroduction des poussières dans le four.

- **L'évapo-incinération** est un procédé qui allie séparation par évaporation des phases aqueuses et huileuses, oxydation thermique et incinération. Cette méthode est adaptée aux effluents aqueux faiblement chargés notamment pour les fluides usagés de travail des métaux.

➤ **La pyrolyse** consiste à chauffer les déchets à température modérée (450 à 750°C) en absence d'air, opération au cours de laquelle les matières organiques sont décomposées en une phase solide (coke de pyrolyse) et en une phase gazeuse (gaz de pyrolyse). Dans certains procédés, une combustion partielle en défaut d'air conduit à une atmosphère réductrice riche en CO et N₂. Cette opération de pyrolyse est donc un pré traitement du déchet, le coke devant être valorisé dans une installation spécifique (cimenteries, sidérurgie, hauts-fourneaux...). On parle alors de "pyrolyse seule", par opposition à la "pyrolyse intégrée" où la valorisation du coke est effectuée sur place, par combustion ou par gazéification.

• **Le traitement biologique et le compostage** : différentes matières organiques sont broyées ensemble et traitées chimiquement dans une cuve. La matière obtenue, après une longue période de fermentation, donnera un compost qui pourra être directement réinjecté dans les sols. Le gaz que dégage cette opération de traitement bio gaz peut être transformé en énergie réutilisable.

• **La stabilisation** permet aux déchets de respecter un certain nombre de critères d'acceptation en centre de stockage et regroupe plusieurs techniques : la solidification, la fixation chimique, la fixation physique, l'enrobage ou encapsulation et la vitrification.

- **La mise en décharge** : les déchets sont enfouis à des endroits aménagés à cet effet appelés « Centre de stockage » ou « Centre d'Enfouissement Technique ». Cette pratique nécessite malheureusement des volumes de stockage de plus en plus importants et présente les risques de pollution de la nappe phréatique, le dégagement des odeurs nauséabondes, etc. La loi française du 13 juillet 1992 prévoit que les "centres de stockage" ne pourront accueillir que des déchets résiduels prétraités appelés encore "déchets ultimes" à partir de l'an 2002.

Ce n'est que récemment que s'est posé de façon cruciale le problème du traitement des déchets [12]. Il n'y a pas si longtemps, tout pouvait se récupérer. Seuls les métaux

constituaient le déchet ultime. Les déchets organiques étant recyclés par la nature. Mais les changements de la nature, notamment l'apparition des plastiques et l'augmentation des quantités de déchets produits imposent aujourd'hui un traitement industriel. Cela se traduit par la mise en œuvre de technologies toujours plus performantes.

Les traitements appliqués aux déchets dépendent des moyens mis à disposition. Au Burkina Faso, les Services Techniques Municipaux, enfouissent tous les déchets solides dans les Centres d'Enfouissement Technique (CET). Par contre dans les pays développés, l'enfouissement des déchets est désormais réservé aux déchets ultimes. Les déchets doivent donc subir un traitement approprié. Par ailleurs les nouvelles réglementations tendent à limiter le gaspillage en favorisant la réutilisation de certains déchets dans le processus de fabrication ou de consommation lorsque leur état le permet. C'est le recyclage des déchets qui connaît

un grand regain dans les pays développés. Le graphique ci-dessous nous donne les parts de quelques filières de traitement en France [13].

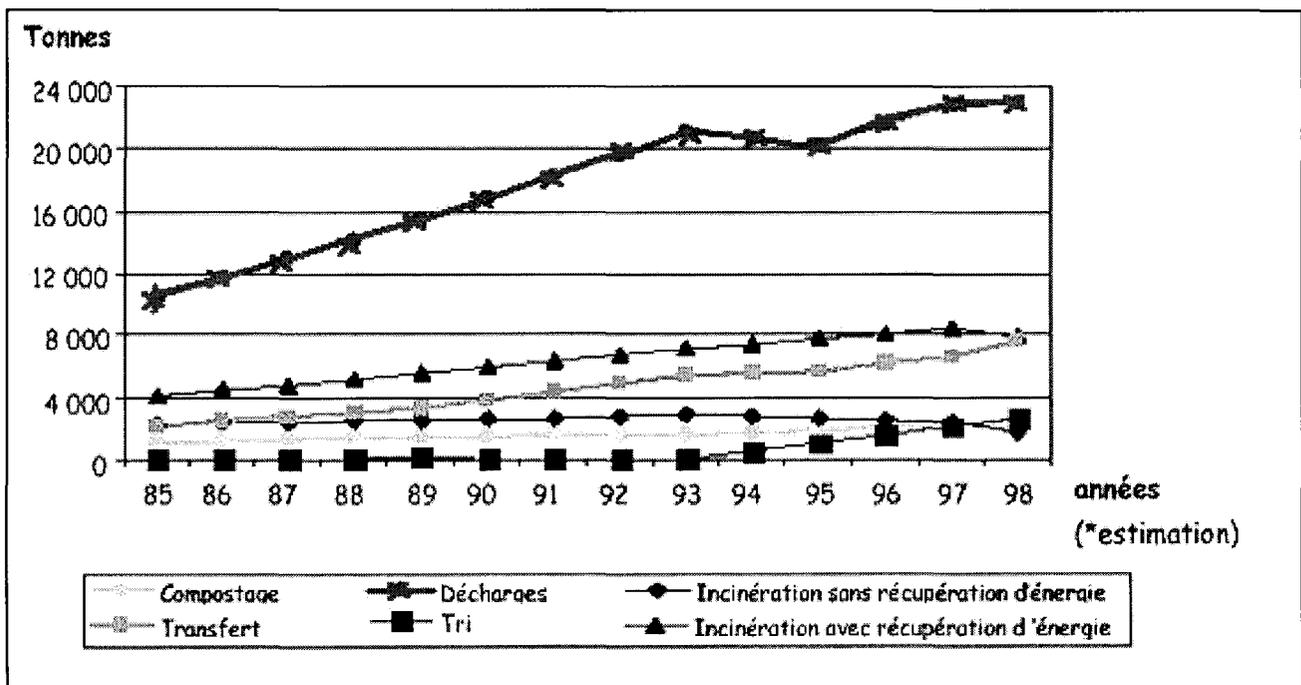


Figure 2 : Evolution des quantités des déchets municipaux et industriels banals traités, en France, entre 1985 et 1998. Source : ADEME[13].

On constate donc qu'après la mise en décharge, c'est l'incinération qui est la plus utilisée en France. Aujourd'hui encore, l'incinération apparaît comme une solution permettant un traitement à l'échelle industrielle des grandes masses de déchets constituées par les Ordures Ménagères (O.M.), les Déchets Industriels Banals (D.I.B.), les Déchets Industriels Spéciaux (D.I.S.) et les Déchets Hospitaliers [12]. Ces traitements se font dans des Unités d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM). La figure 3 donne le schéma de principe d'une UIOM. L'Usine est principalement constituée d'un four auquel sont adjoints des dispositifs annexes pour le stockage, l'introduction du déchet et le traitement des effluents liquides, solides ou gazeux.

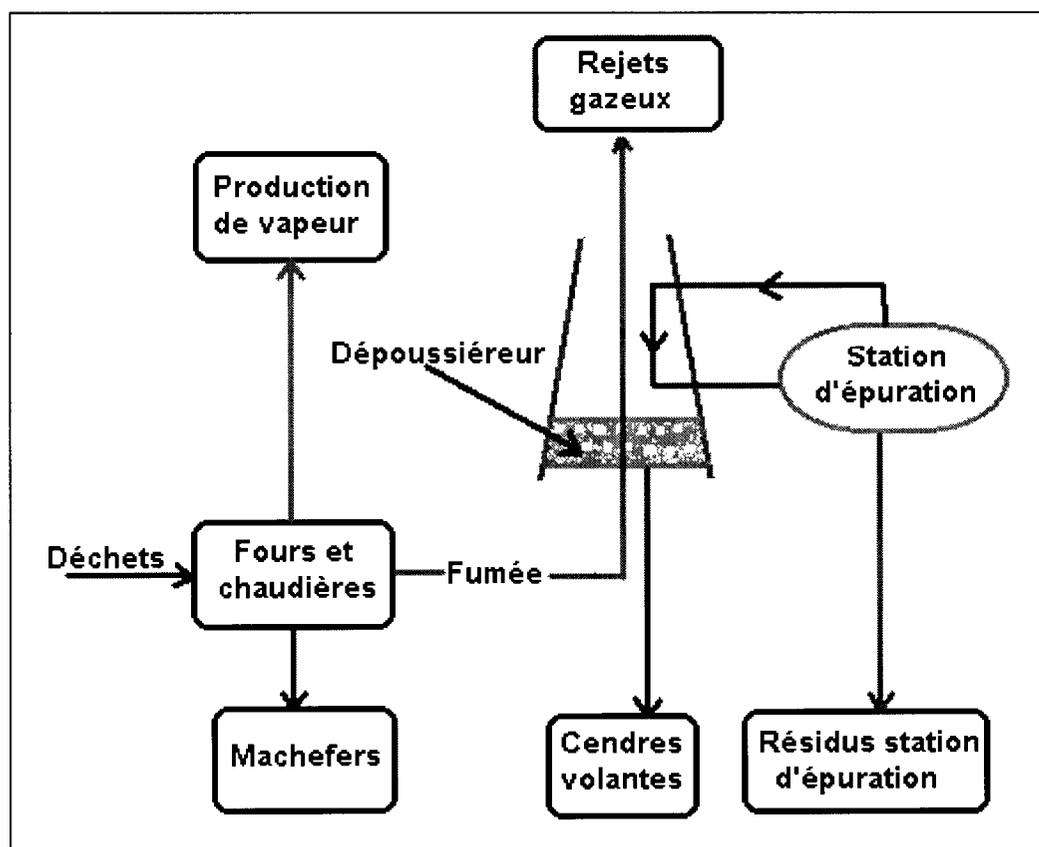


Figure 3 : Schéma d'une UIOM, inspiré de J. PALANTONI et L. TADRIST [12].

1.4. Les fours rotatifs

Les fours rotatifs sont très largement utilisées dans l'industrie [14, 15]. On les utilise pour la calcination du calcaire, la fabrication du ciment, la calcination du coke

pétrolier, le séchage de divers matériaux etc. Leur plus grande utilisation est la fabrication du ciment. Les tailles de fours rotatifs peuvent être impressionnantes.

Un four rotatif est principalement constitué d'un cylindre légèrement incliné par rapport à l'horizontale afin de faciliter le contact entre l'air de combustion et le déchet. Ce type de four permet d'incinérer tout type de déchets ayant un PCI supérieur à 3 MJ/Kg. Les températures d'utilisation peuvent varier de 800 °C à 1600 °C.

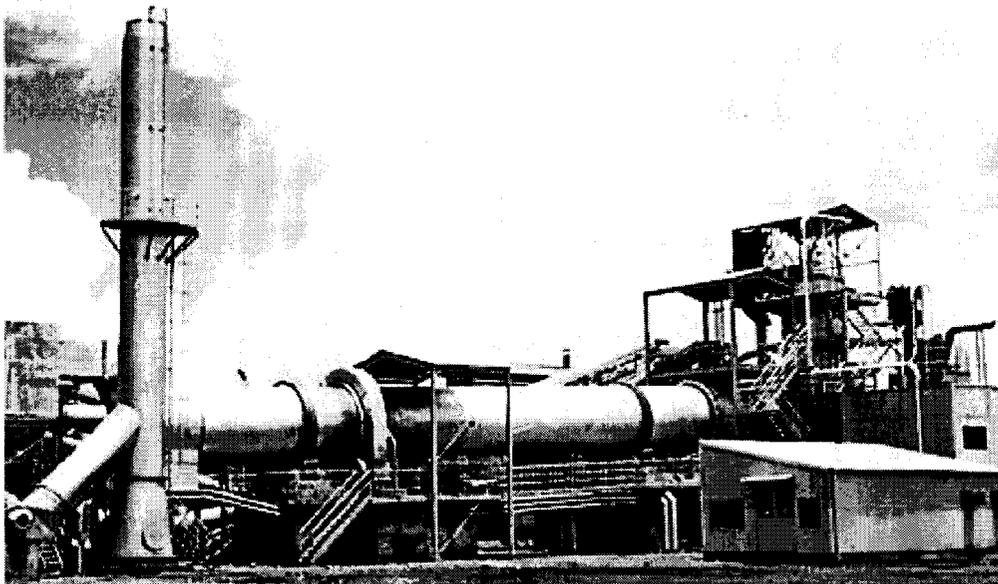


Figure 4 : Un four rotatif construit par la société SIKO [16]

Les fours rotatifs jouissent d'un intérêt croissant pour le traitement des déchets, à cause de la grande variété des déchets : solides, liquides ou gazeux qu'ils permettent de traiter. Ils peuvent traiter des déchets de composition variable, avec des pouvoirs calorifiques variables, et l'évacuation des produits de la combustion ne présente pas de difficulté majeure [17].

En général, les fours rotatifs ont une profondeur de lit assez grande. THEODORE et REYNOLDS [18] indiquent que le rapport L/D de la longueur au diamètre est généralement compris entre 2 et 10.

L'un des principaux avantages du four tournant est la qualité du brassage assuré par la rotation du four qui provoque un retournement périodique. L'introduction de l'air au travers du lit de déchets permet également d'assurer la qualité de la combustion.

Cette technique présente en outre l'avantage de réduire le temps de séjour. Aussi, les performances de ces fours sont bonnes mais ils présentent des points faibles:

- limitation des volumes traités compte tenu du mode d'introduction des déchets par poussoir ;
- évacuation des mâchefers à température élevée (300 à 500 °C) rendant leur manutention délicate avant refroidissement;
- important choc thermique dans la chambre de combustion, les parois sont alternativement au contact avec les couches de déchets à 100 °C et aux gaz de combustion de l'ordre de 800 à 1000 °C. Cela entraîne une dégradation plus rapide des grilles et calorifuges.

Un exemple de four rotatif pour le traitement des déchets municipaux est montré ci-dessous.

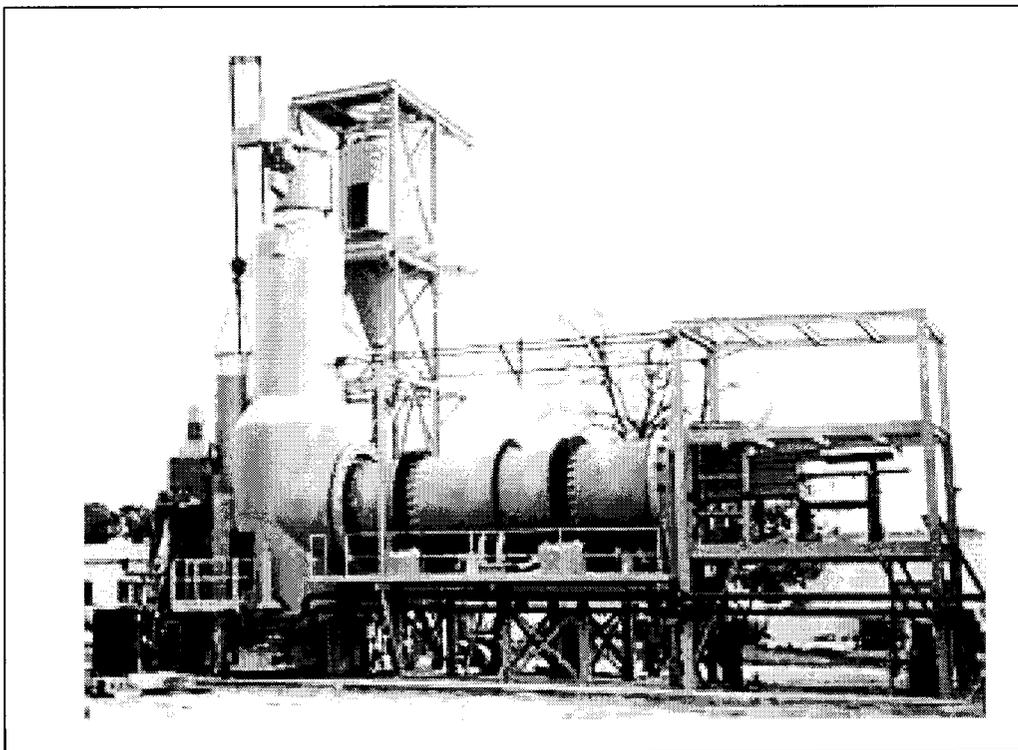


Figure 5 : Un four rotatif pour traitement des déchets ménagers aux Pays-Bas [34].

Les fours rotatifs sont l'objet de nombreux développements en matière de Déchets Industriels. C'est ainsi que l'agence pour la protection de l'environnement

(E.P.A.- U. S. A.) développe un four tournant pilote montré à la figure 6, dont les principales caractéristiques, diffusées directement sur Internet, sont les suivantes :

- puissance consommée : 75 kW,
- capacité de traitement thermique moyenne : 2200 kW,
- flexibilité autorisant des tests paramétriques.

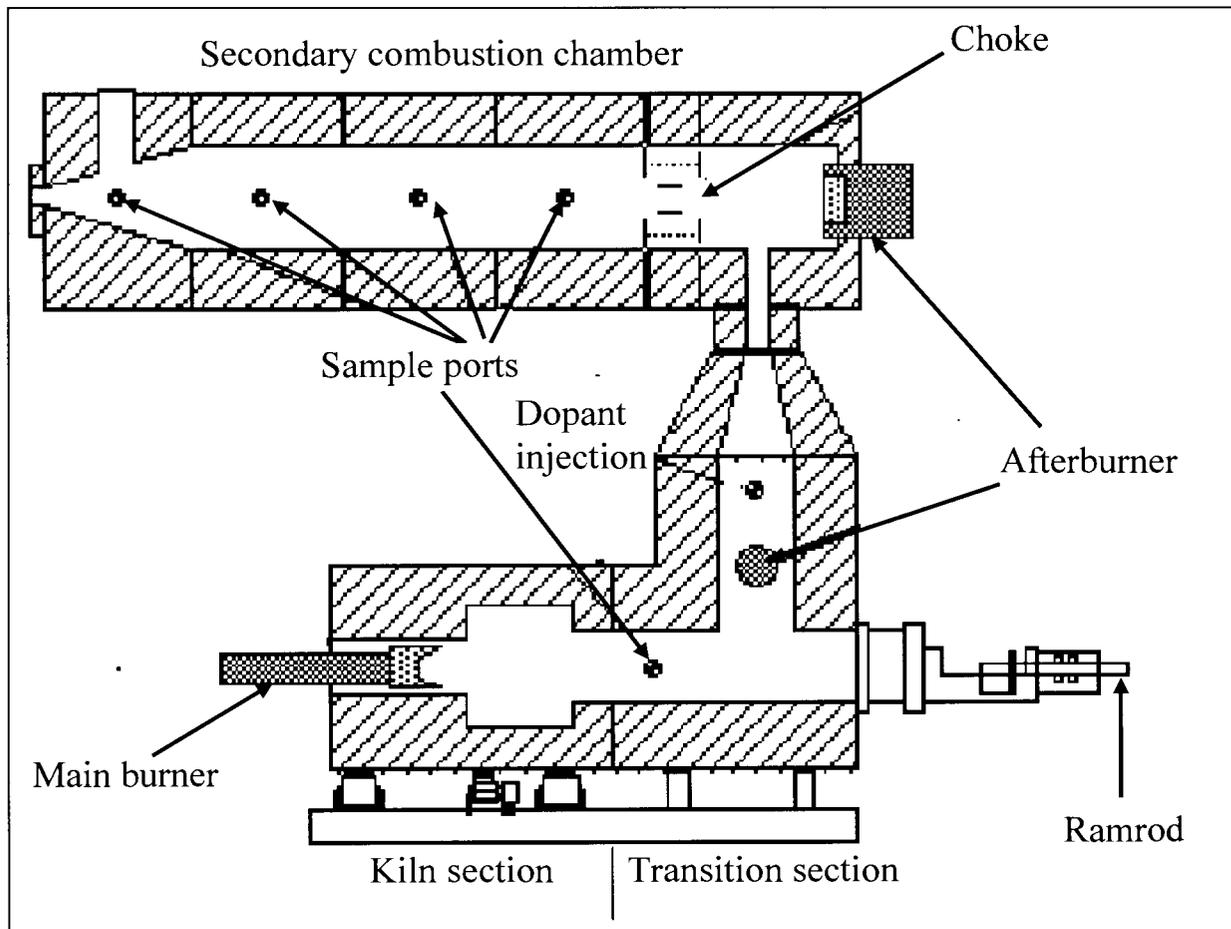


Figure 6 : Four rotatif pilote de l'EPA (USA) [19, 20]

Il est possible de jouer sur tous les paramètres de fonctionnement d'un four rotatif assez facilement :

- sur la température T par ajout de fuel si nécessaire,
- sur le temps de séjour T_s en jouant sur la vitesse de rotation,
- le nombre de Reynolds (turbulence) avec la combustion secondaire, etc.

Cela rend les fours rotatifs très adaptables et donc intéressantes pour le Burkina Faso.

1.5. Les fours à grilles mobiles.

L'incinération par four à grille est la technologie de traitement thermique la plus utilisée [21, 22]. Les déchets sont introduits dans le four par la trémie de chargement. Ils arrivent sur la grille mobile dont le mouvement assure le brassage, afin d'assurer une combustion complète des déchets.

L'air primaire entre par le bas de la grille sur laquelle glissent les déchets. Sur la grille a lieu la combustion des déchets Le principe de fonctionnement de ces fours à grille mobiles est le suivant:

- les déchets sont introduits dans le four par la trémie de chargement,
- la grille mobile (figure 8, à gauche) entraîne les déchets vers le bas,
- sous la grille arrive l'air de combustion primaire,
- les gaz de combustion remontent la colonne au dessus de la grille,
- les mâchefers sont évacués par le bas de la grille,
- pour des unités produisant aussi de l'énergie, les gaz chauds issus de la combustion traversent la chaudière dans laquelle est produite de la vapeur d'eau à haute pression, cette vapeur d'eau peut alors actionner les turbines génératrices d'énergie électrique,
- les fumées sont enfin traitées avant leur rejet dans l'environnement.

Afin d'améliorer la combustion, on peut injecter un air d'appoint au dessus des grilles, cet air est appelé air secondaire. Ce type de four est dit à air étagé. Suivant le sens de circulation de l'air secondaire et des déchets, on obtient des fours co-courant, à courant direct ou à contre courant.

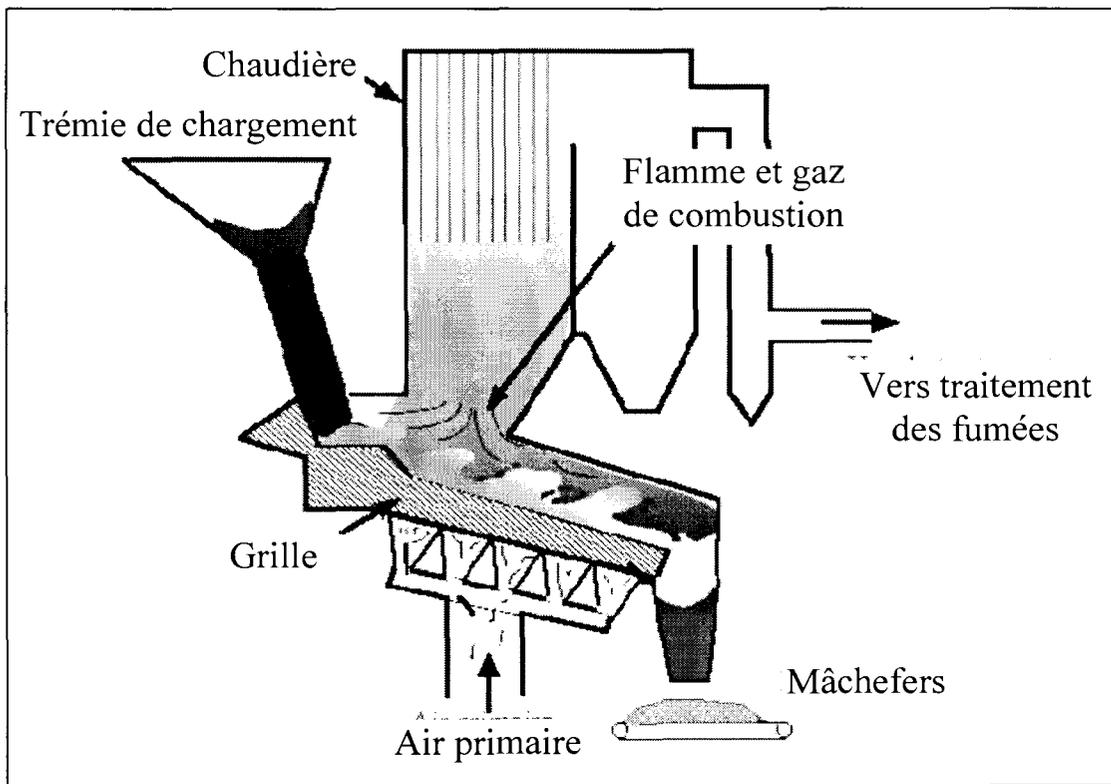


Figure 7 : Four à grilles mobile. PANTALONI et TADRIST [11]

Nous avons sur la figure 8 (ci-dessous, à droite), un exemple de four à grille mobiles à contre-courant. Sur cette figure :

- (1) est le point d'entrée des déchets dans le four,
- (2) la grille mobile,
- (3) la chaudière.

Ce type de four est utilisé pour les déchets les plus humides. Le Burkina Faso est un pays sahélien avec un climat essentiellement sec. Les caractérisations des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou conduites par le LPCE ont d'ailleurs montré que l'humidité des déchets de Ouagadougou est assez faible. Ce type de four n'est donc pas particulièrement adapté pour le Burkina Faso.

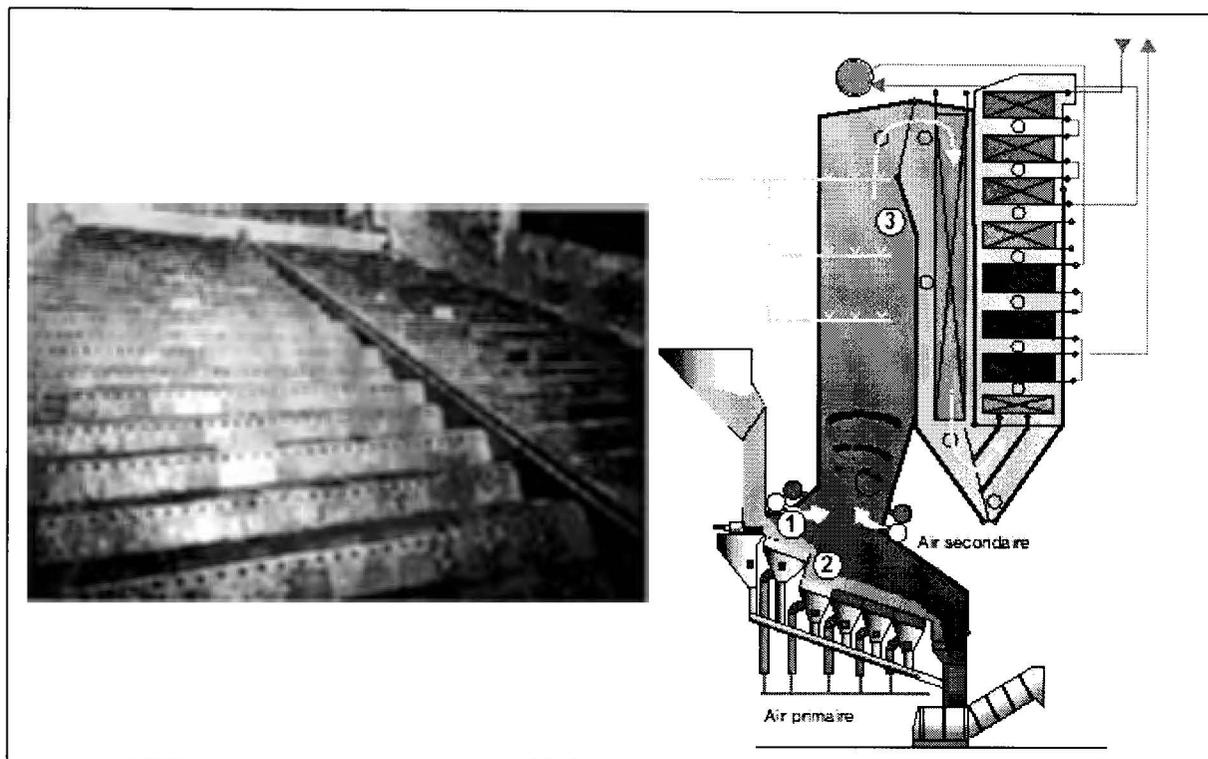


Figure 8 : . Four à grilles mobile à air étagé. Source Van Roll INOVA SA [20]

1.6. Les fours à lits fluidisés

Le principe de la technique dite du " lit fluidisé " est d'effectuer la combustion des produits solides dans un lit de matériaux inertes mis en suspension par une injection d'air chaud [17]. Il s'agit, le plus souvent, d'un mélange de sable auquel on ajoute une petite fraction de déchets (5%) qui forment la base du " lit ". L'ensemble est rendu fluide par injection d'air (vertical, horizontal, à la base ou en parois du four...).

La température optimale de fonctionnement est comprise entre 450 et 1000 °C. Il est possible d'améliorer la combustion par une meilleure circulation au sein du lit. Ce qui donne les fours à Lit Fluidisé Circulant (L.F.C.), par l'adjonction de plaque déflectrice et de sable qui assure l'efficacité des transferts thermiques.

La technologie des lits fluidisés relativement récente est chère. Elle exige que les déchets à traiter aient une granulométrie et une composition homogène. Elle est donc difficilement utilisable au Burkina Faso.

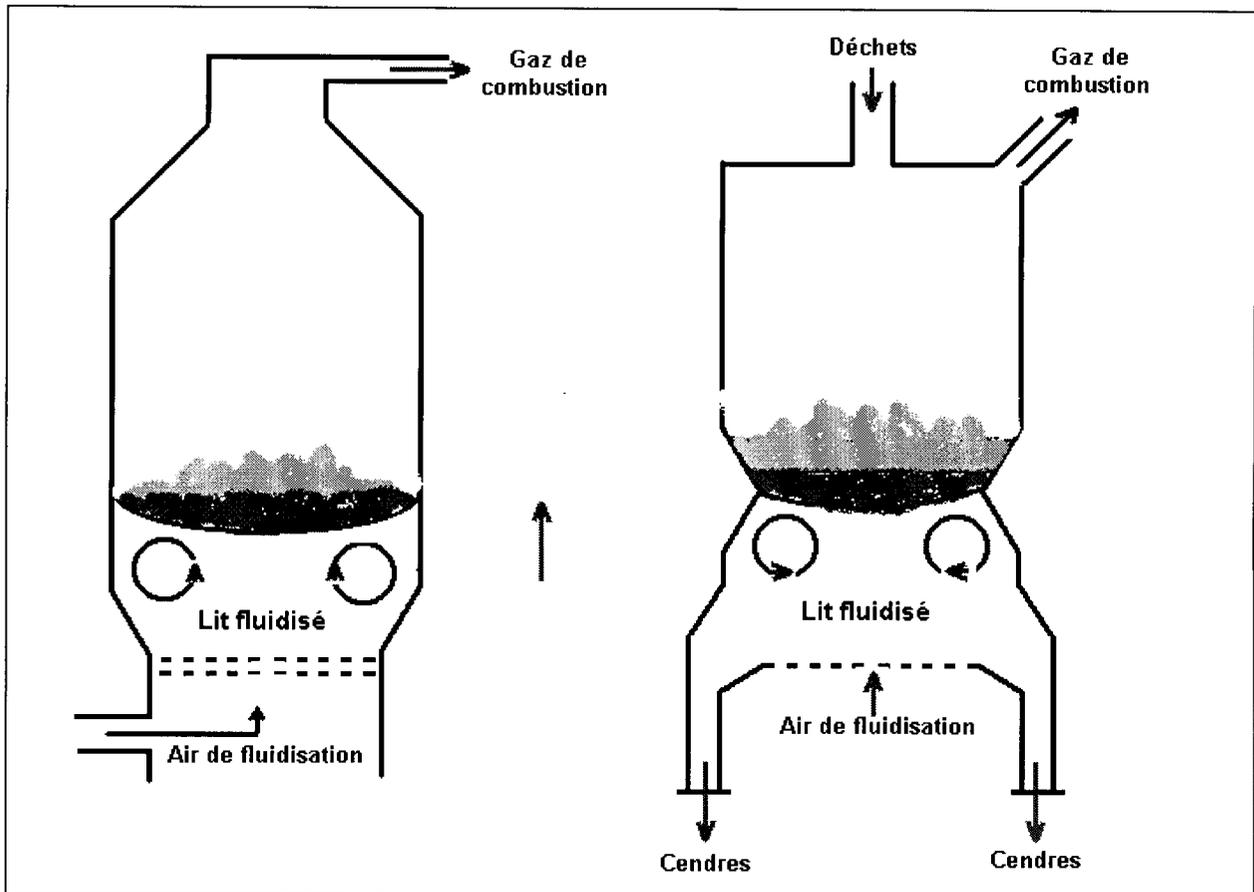


Figure 9 : Fours à lit fluidisé dense à gauche et lit fluidisé circulant à droite. Source PANTALONI et TADRIST [1].

1.7. Diagnostic énergétique d'un four thermique [23]

Dans un four thermique, la combustion est souvent réglée d'une manière plus ou moins empirique. Cependant l'utilisation d'un diagramme d'Oswald permettrait, à partir de l'analyse des fumées, de déterminer au cours du fonctionnement, l'excès d'air et d'optimiser celui-ci. L'inconvénient majeur du diagramme d'Oswald est qu'il est spécifique à un combustible donné.

DUMEZ et all ont donc établi un ensemble de 23 diagrammes applicables aux combustibles solides, liquides et gazeux utilisés en France. Pour concevoir ces diagrammes, ils ont tenu compte de l'équilibre chimique CO , CO_2 , H_2 et H_2O dans le cas des combustibles hydrogénés. L'utilisation conjuguée du diagramme d'Oswald et

des tableaux des caractéristiques stœchiométriques des combustibles permet d'obtenir le rendement de combustion avec précision.

1.7.1. Rappel de lois générales de la combustion.

La combustion est une réaction chimique, à température élevée, entre un combustible qui contient essentiellement du carbone, de l'hydrogène, parfois un peu de soufre, et d'un comburant, généralement de l'air atmosphérique.

A . Combustions réalisées dans les chaudières.

Dans un four thermique rotatif, le système est à pression sensiblement constante et voisine de la pression atmosphérique. La combustion conduit à la libération d'énergie calorifique, dont une fraction, que l'on souhaite la plus élevée possible, peut être récupérée dans un but bien défini : chauffage des locaux, production d'énergie, etc.

A.1 Combustion neutre ou stœchiométrique.

C'est une combustion complète sans excès ou défaut d'air dans laquelle les fumées ne contiennent que du CO_2 , H_2O , N_2 , SO_2 . C'est elle qui permet d'avoir le meilleur rendement.

- **Le pouvoir comburivore** : c'est la quantité d'air nécessaire à la combustion complète d'un kg de combustible solide ou liquide, ou d'un m^3 de combustible gazeux. Il s'exprime en poids, on le note P_a ou en volume, auquel cas on le note V_a .
- **Le pouvoir fumigène** : c'est le poids ou le volume de fumées dégagé lors de la combustion stœchiométrique d'un kg d'un m^3 N de combustible gazeux.

On l'exprime :

- en poids (P_f) ou volume (V_f) sur fumées humides (l'eau à l'état de vapeur). Il intervient dans le calcul du rendement de la combustion.
- en poids (P_f') ou volume (V_f') sur fumées sèches (l'eau à l'état condensé). Il intervient dans l'analyse des fumées et le contrôle de la combustion.

- La teneur en CO₂ des fumées neutres.

Elle intervient dans le contrôle de la combustion. On l'exprime sur fumées sèches et on la désigne par α_0' (%).

A. 2. Combustion oxydante.

C'est une combustion complète réalisée avec un excès d'air. Les fumées contiennent CO₂, H₂O, SO₂, N₂ et de l'oxygène libre.

Le taux de l'excès d'air doit être suffisant pour éviter la présence des imbrûlés gazeux.

Il ne doit pas être trop important car il conduit à une baisse du rendement par augmentation des pertes sensibles à la cheminée et favorise la formation de gaz polluants tels que le SO₃ et les traces de NO₂. Cet excès d'air dépend du combustible, de la conception de la chambre de combustion et de la turbulence au foyer. Grâce au contrôle de la combustion, on peut déterminer l'excès d'air optimal pour une installation en fonctionnement. Pour les chaudières fonctionnant au fioul, l'excès d'air optimal est de 5 à 20% pour un matériel bien conçu et en parfait état de fonctionnement. Le rendement est un peu plus faible que celui de la combustion neutre à cause des pertes par chaleur sensible des fumées.

A. 3. Combustion réductrice.

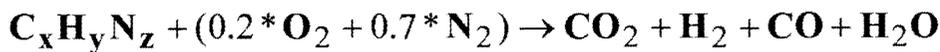
C'est une combustion incomplète par défaut d'air. Les fumées contiennent CO₂, H₂O, SO₂, N₂ et les imbrûlés gazeux comme CO et H₂ mais pas d'oxygène libre. La présence des imbrûlés gazeux diminue le rendement de combustion.

A. 4. Combustion mixte.

Elle est particulièrement défavorable pour le rendement de combustion. Les fumées contiennent CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , SO_3 et des imbrûlés gazeux comme CO et H_2 .

B. Equilibre CO et H_2 dans les fumées.

La combustion peut être traduite par une équation du type :



Les équations d'équilibre entre les différents éléments dans le four conduisent à la relation :

$$Z = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{CO}}} = K \frac{100}{\alpha_0'} \frac{V_f - V_{f'}}{V_{f'}} \frac{\frac{\alpha'}{\beta'} + 1}{\frac{\alpha'}{\beta'} + K}$$

Pour Les combustibles solides, les combustibles liquides (fiouls domestiques, fiouls lourds), les combustibles gazeux, le terme

$\frac{\frac{\alpha'}{\beta'} + 1}{\frac{\alpha'}{\beta'} + K}$ est voisin de 1 pour les applications courantes. L'équilibre chimique

on aura donc

$$Z = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{CO}}} = K \frac{100}{\alpha_0'} \frac{V_f - V_{f'}}{V_{f'}}$$

Pour les foyers de chaudières les plus courants, les résultats expérimentaux montrent que pour Z on peut adopter les valeurs suivantes :

- Charbons, gaz de haut fourneau, gaz à l'air : $Z = 0$.
- Bois, fiouls : $Z = 0,5$.
- Propane et butane commerciaux : $Z = 0,7$.
- Gaz naturels : $Z = 1$.

C. Equations de la combustion pour les fumées non hydrogénées

Dans le cas général d'une combustion mixte, on peut écrire :

$$\alpha' = \frac{\alpha' V_f' - V_{CO}}{V_f' \pm e V_a + \frac{1}{2} V_{CO}}$$

$$\beta' = \frac{V_{CO}}{V_f' \pm e V_a + \frac{1}{2} V_{CO}}$$

$$\omega' = \frac{\pm 20.8 e V_a + \frac{1}{2} V_{CO}}{V_f' \pm e V_a + \frac{1}{2} V_{CO}}$$

Dans ces expressions :

V_a = pouvoir comburivore.

V_f' = pouvoir fumigène sur fumées sèches.

α' = teneur en CO_2 des fumées neutres.

+e = e = taux de l'excès d'air (%).

-e = d = taux du défaut d'air (%)

V_{CO} = volume de CO imbrûlé par unité de combustible.

Ces trois équations montrent que :

a) Une combustion mixte est entièrement définie lorsqu'on connaît :

1. Soit les caractéristiques stœchiométriques du combustible ainsi que les teneurs en CO_2 α' et en Oxygène ω' des fumées sèches.
2. Soit les caractéristiques stœchiométriques du combustible ainsi que les teneurs en CO_2 α' et en Oxygène ω' et CO des fumées.

b) Une combustion oxydante est entièrement définie lorsqu'on connaît :

1. Soit les caractéristiques stœchiométriques du combustible et la teneur en CO_2 α' des fumées sèches.
2. Soit les caractéristiques stœchiométriques du combustible et la teneur en Oxygène ω' et CO des fumées sèches.

D. Equations de la combustion pour les fumées hydrogénées

Dans le cas où les fumées contiennent de l'hydrogène libre, les équations de combustion s'écrivent :

$$\alpha' = \frac{\alpha' V_f' - V_{CO}}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}(V_{CO} + 3V_{H_2})}$$

$$\beta' = \frac{V_{CO}}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}(V_{CO} + 3V_{H_2})}$$

$$\omega' = \frac{\pm 20.8 eV_a + \frac{1}{2}(V_{CO} + V_{H_2})}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}(V_{CO} + 3V_{H_2})}$$

$$\eta' = \frac{V_{H_2}}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}(V_{CO} + 3V_{H_2})}$$

$$\beta' = \frac{V_{CO}}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}V_{CO}}$$

V_{H_2} = volume de H_2 imbrûlé par unité de combustible. Faisons intervenir dans ces

expression le terme $Z = \frac{V_{H_2}}{V_{CO}}$, on obtient :

$$\alpha' = \frac{\alpha' V_f' - V_{CO}}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}(1 + 3Z)}$$

$$\beta' = \frac{V_{CO}}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}(1 + 3Z)}$$

$$\omega' = \frac{\pm 20.8 eV_a + \frac{1}{2}V_{CO} (1 + Z)}{V_f' \pm eV_a + \frac{1}{2}V_{CO} (1 + 3Z)}$$

Avec simplement

$$\eta' = Z.\beta'$$

Une combustion sera définie si l'on connaît Z et deux des trois teneurs α' , ω' et β' .

E. Le rendement de combustion

D'habitude, on définit le rendement par rapport au PCI du combustible et on se réfère à la température ambiante T_a .

L'expression générale du rendement de combustion est la suivante :

$$R_c = \left(1 - \frac{Q_s + Q_{CO} + Q_{H_2} + Q_I - Q_{H_2O}}{P_{ci} + Q_c + Q_A} \right)$$

Dans cette équation :

Q_s = pertes par chaleur sensible des fumées qui sortent à la cheminée à une température T_s .

Q_{CO} , Q_{H_2} , Q_I = pertes par chaleurs latentes dues aux imbrûlés gazeux et solides.

Q_c = chaleur sensible aminée par le combustible lorsqu'il est réchauffé à une température T_c . C'est le cas des installations fonctionnant au fioul lourd.

Q_A = chaleur sensible aminée par le comburant lorsqu'il est réchauffé à une température T_a' . C'est le cas de certaines chaudières industrielles.

F. Principe et utilisation des diagrammes d'Oswald.

Les diagrammes d'Oswald permettent, avec deux valeurs, par exemple la teneur en gaz carbonique et la teneur en oxygène, de situer le point représentatif de la combustion et aussi de vérifier l'analyse des fumées et de calculer les caractéristiques de la combustion en déterminant l'excès ou le défaut d'air.

F.1. Diagramme d'Oswald informatisé pour fumées non hydrogénées.

Ce diagramme est valable pour un combustible donné et pour tous les types de combustion. Il comprend :

- Deux demi axes rectangulaires $O\alpha'$ en abscisses sur lequel on porte les teneurs en gaz carbonique et $O\omega'$ en ordonnées, sur lequel sont portés les teneurs en oxygène.

- La droite des combustions oxydantes (teneur $\beta' = 0$). Cette droite est graduée en excès d'air.
- L'axe vertical des ordonnées ($\omega' = 0$) où sont groupés toutes les fumées purement réductrices. Cette droite est graduée, sur sa partie gauche, en défaut d'air, sur sa partie droite en teneur en CO_2 (α'_0).
- Les fumées neutres sont représentées par le point α'_0 situé sur l'axe vertical ($\beta' = 0, \omega' = 0$).

Ces droites et le point représentatif de la combustion sont représentés sur la figure ci-dessous.

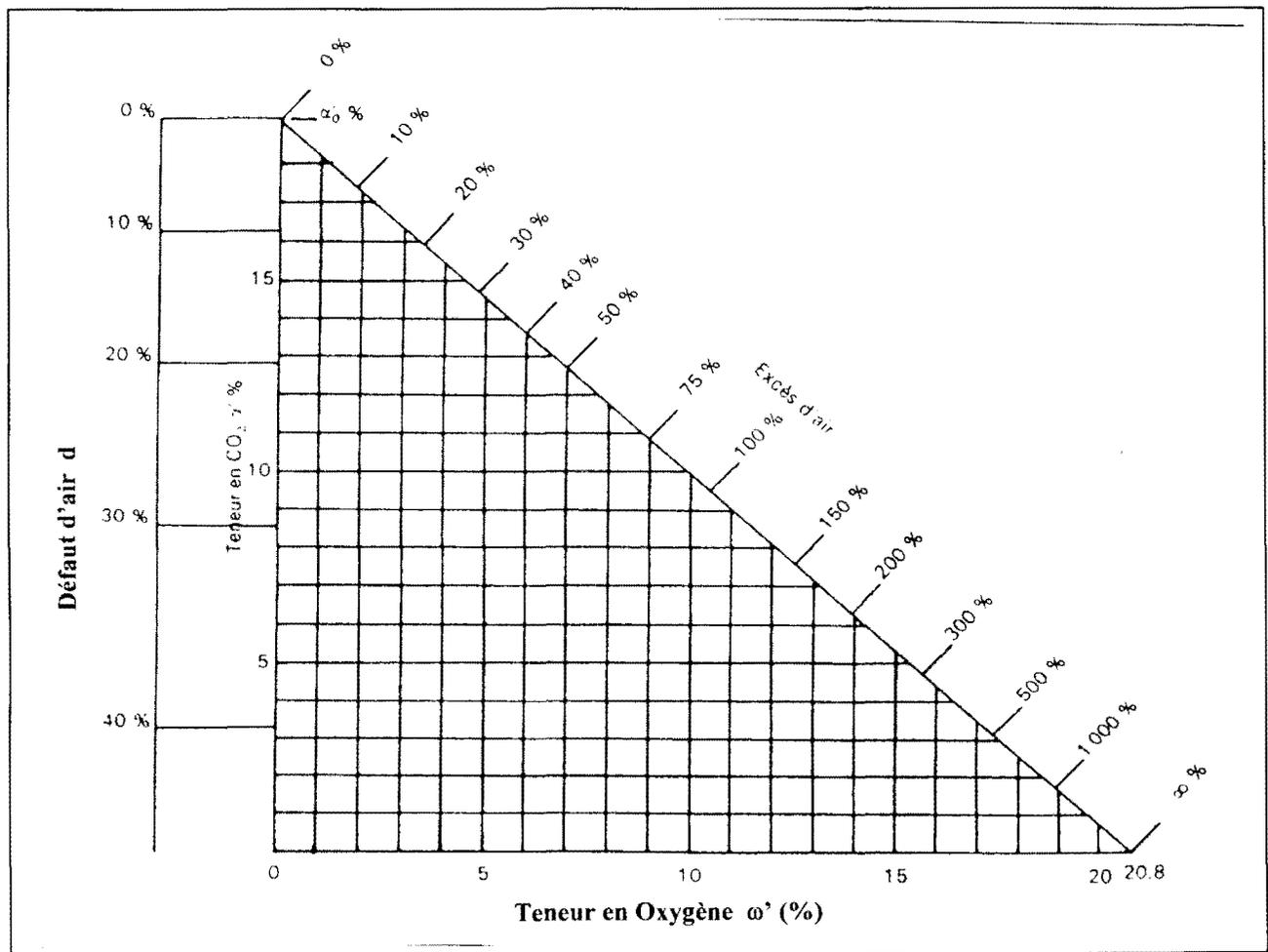


Figure 10: Point représentatif de la combustion neutre (A. et M. DUMEZ)

- Les égales teneurs en CO ($\beta' = \text{constante}$) sont groupés sur un réseau de droites parallèles à la droite des combustions oxydantes.

- La droite des combustions incomplètes avec l'air théorique ($e = d = 0$) est menée à partir de α'_0 et coupe l'axe des teneurs en oxygène en un point

d'abscisse : $\omega' = \frac{\alpha'_0}{\alpha'+2}$

Elle partage le plan en deux zones : la zone de combustions mi-oxydantes et la zone mi-réductrices.

- L'ensemble du diagramme d'Oswald est donné sur la figure ci-dessous.

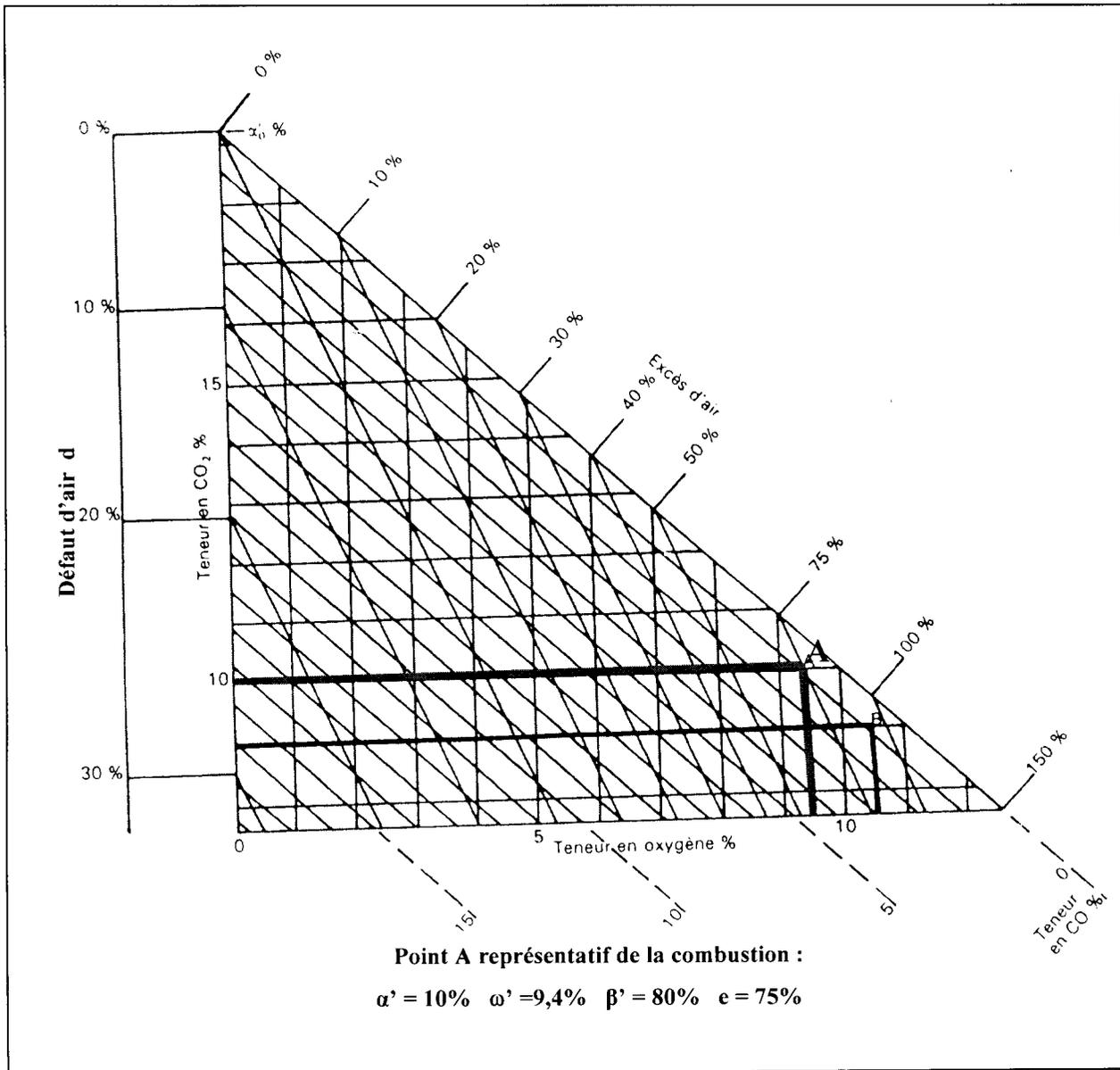


Figure 11: Diagramme d'Oswald complet (source : A et M. DUMEZ)

F. 2. Diagramme d'Oswald pour les fumées hydrogénées.

C'est une extension du diagramme d'Oswald aux fumées hydrogénées en prenant Z comme paramètre. Il comprend la droite des combustions oxydantes, qui ici sont indépendantes de Z , la droite des combustions réductrices, le réseau des droites d'égale teneur en CO , les droites d'égale excès et d'égale défaut d'air qui convergent en un point dont les coordonnées sont fonctions de Z . Sur la figure ci-dessous représentant le diagramme d'un fuel lourd pour lequel $Z = 0,5$ a été porté le point A défini par le point de teneur en CO_2 $\alpha' = 11\%$ et la teneur en oxygène $\omega' = 6\%$. On peut alors lire sur le diagramme la teneur en CO : $\beta' = 0,6\%$ et l'excès d'air $e = 34,7\%$. On déduit alors le rendement $\eta = Z \cdot e = 30\%$.

1.7.2 Modèles des fours rotatifs.

Plusieurs auteurs ont décrit le four rotatif. Beaucoup de modèles à une dimension ont été proposés [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]. Suivant les intérêts et les objectifs poursuivis, les auteurs mettent plus en évidence certains paramètres que d'autres. KERSDUSWAN [23] retient trois paramètres pour l'incinération :

- a) La température : « elle doit être suffisante pour obtenir le cracking thermique des molécules constitutives du déchet ». Il donne 900°C comme température optimale pour l'incinération des déchets banaux.
- b) Le temps de séjour : « Il est le rapport du volume de la chambre sur le débit des gaz. On compte 1 à 2s pour les matières organiques, mais 3 à 4s pour certains composés halogénés. Le temps de séjour doit respecter les vitesses de vaporisation des composés volatils et les vitesses de réaction des gaz formés ».
- c) La turbulence : « Elle a pour objectif de maintenir l'homogénéité du mélange de façon à éviter soit des déficits ponctuels en oxygène, soit des permanences de zones froides.

A. La technologie du four rotatif.

Un incinérateur rotatif est constitué d'un cylindre légèrement en pente. Les déchets entrent dans le four et avancent sous l'action des forces de gravité. Un combustible d'appoint apporte la chaleur nécessaire pour initier la combustion ou compenser la faible valeur du PCI. On utilise le fuel ou le gaz naturel à cet effet. On distingue au moins cinq types de ces fours [19, 34]

A.1. Le fours co-courant et contre-courant:

Ils se différencient par la disposition de la source de la chaleur d'appoint :

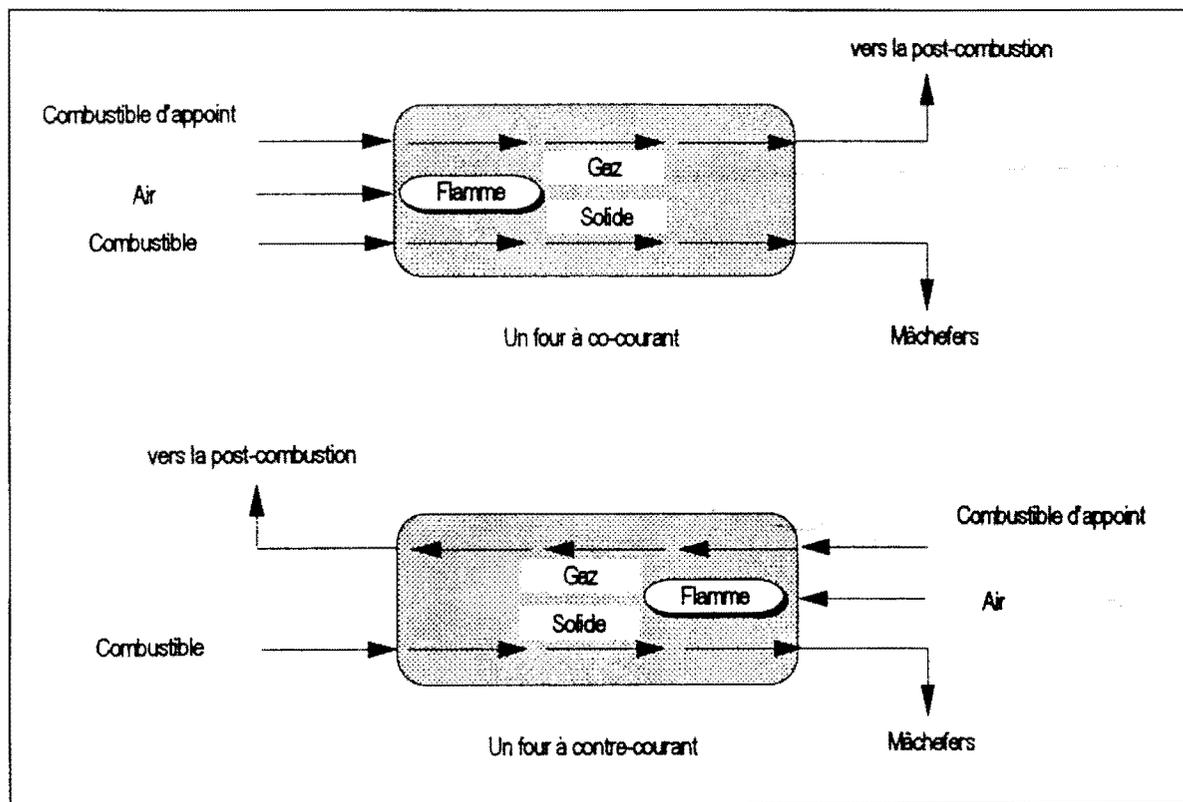


Figure 12 : Fours à co-courant et contre-courant (KERDSUWAN).

Dans le four à co-courant, le déchet et le combustible d'appoint sont introduits du même côté. L'unité entière est maintenue dans un régime de température souhaitée. Il permet de contrôler efficacement les différentes zones de combustion. Il est principalement utilisé pour l'incinération des déchets.

Dans le four à contre-courant, les déchets sont introduits du côté froid, opposé au côté d'arrivée du combustible d'appoint. Ce type de four donne le maximum de taux de transfert de chaleur et de masse. Il est toutefois difficile de contrôler les paramètres opératoires tel que le temps de séjour des déchets solides. Par conséquent, ce four est principalement utilisé en métallurgie et en raffinerie, plutôt que pour l'incinération des déchets. Les profils des températures dans ces fours sont donnés ci-dessous :

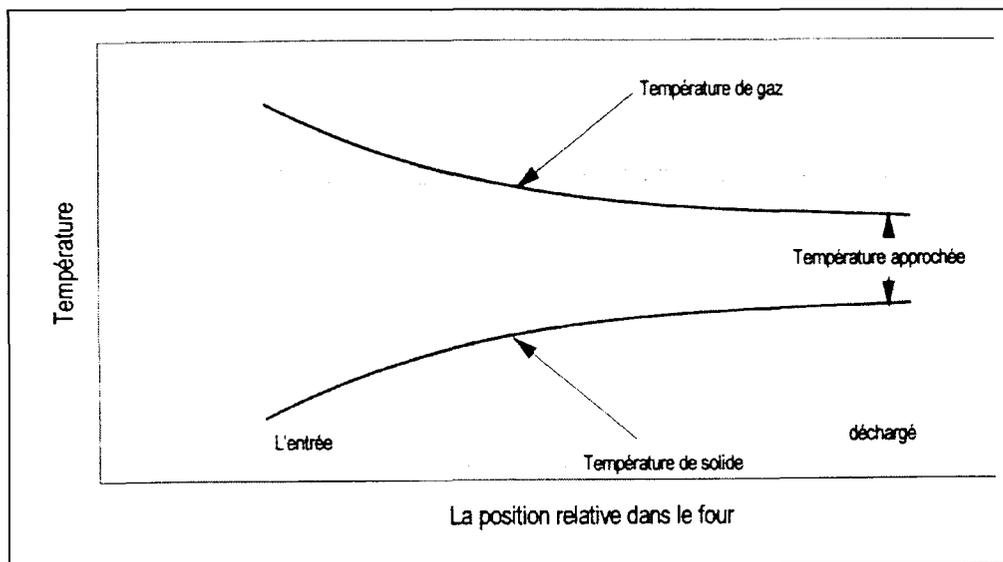


Figure 13 : Profil des températures dans un four co-courant (KERDSUWAN).

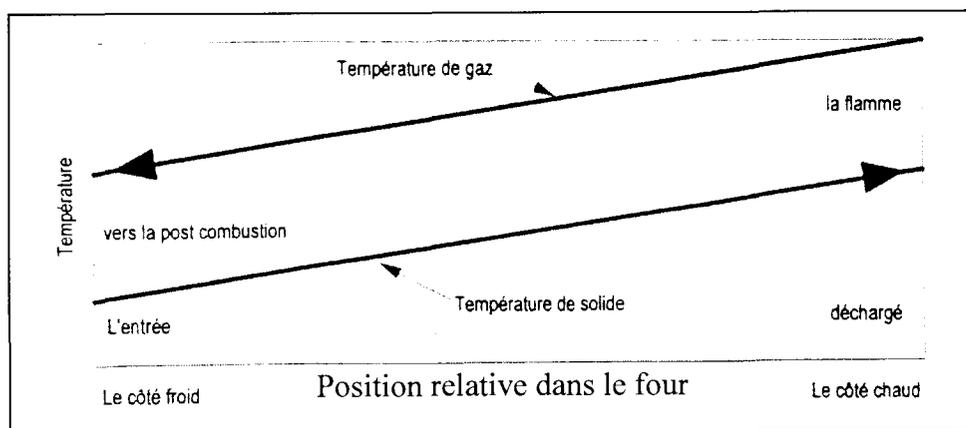


Figure 14 : Profil des températures dans un four à contre-courant (KERDSUWAN).

A.2. Le four rocking:

Il se distingue des fours conventionnels par une alimentation des déchets en temps différé, plutôt qu'en continu ou semi-continu. Il permet de traiter les déchets municipaux, industriels, médicaux, brûler les pneus, etc.

A.3. Les fours slagging et ashing :

Ils se distinguent par la température dans le four. Le four slagging travaille entre 1200 et 1400°C environ, alors que le four ashing travaille à des températures plus basses, entre 650 et 1000 °C.

B. Section longitudinale du four.

Les auteurs ne donnent pas la même représentation. KOÏVO et CHASE [29] distinguent trois zones dans le four : la zone de séchage, la zone de chauffage et la zone de combustion. KERDSUWAN [23] distingue quatre zones :

- La zone d'entrée : les déchets y sont introduits par la porte d'entrée. Ils sont chauffés principalement par l'effet de rayonnement de la paroi réfractaire. La température dans cette zone est inférieure à 400 °C. Les déchets sont séchés, la dévolatilisation commence et les déchets solides se mettent à fondre. Normalement dans cette zone, il n'y a ni flamme, ni nappe de scories sur la paroi réfractaire.
- La zone de fusion et vaporisation : dans cette zone, la température des déchets atteint 900 °C environ. Une forte dévolatilisation et une évaporation sont ainsi observées. La paroi réfractaire est très agressée du fait de processus de condensation, d'infiltration et de sollicitation des composés organiques qui réagissent de plus avec la matière réfractaire.
- La zone de flamme : la température des déchets solides est d'environ 1200 °C. La paroi réfractaire est également sollicitée par infraction et réaction des scories.

- La zone d'extinction : une nappe continue de scories est formée. Les gaz et la zone de flamme se propagent horizontalement à travers le four, la température des déchets solides atteignant son maximum dans cette zone. A la fin les résidus sont évacués.

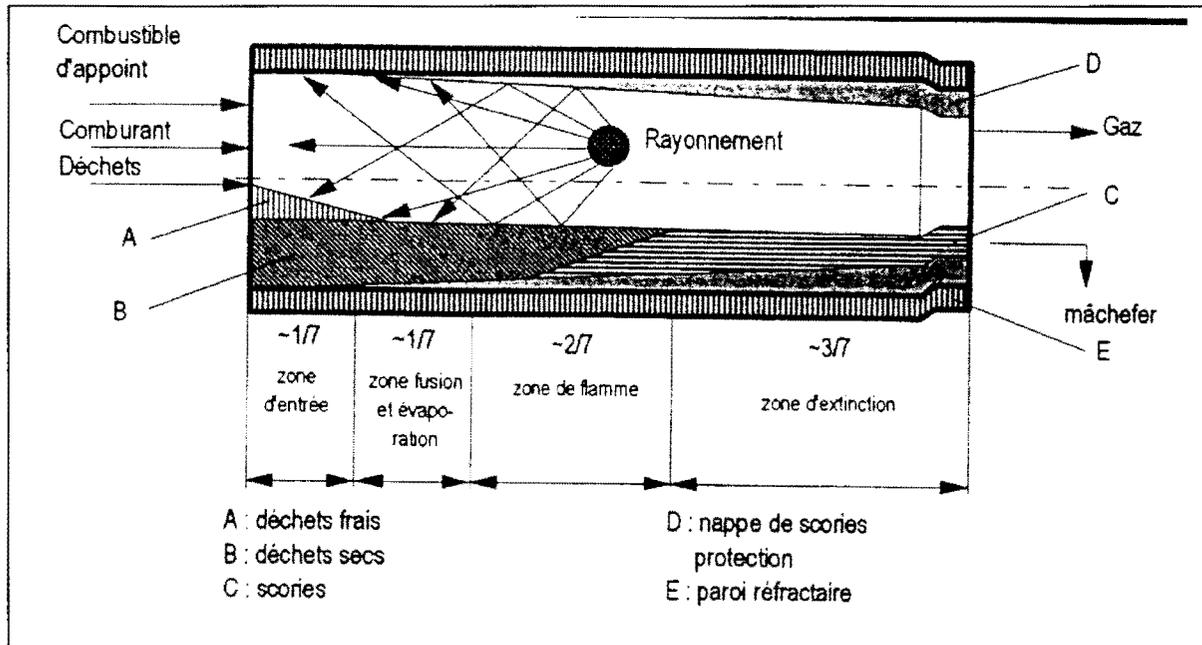


Figure 15 : Différentes zones d'un four rotatif (KERDSUWAN).

C. La chambre de post combustion

Elle a pour rôle de parfaire la combustion par la destruction de tous les composés organiques provenant de la chambre de combustion primaire. A cet effet la température doit être maintenue à environ 1200 °C, avec un temps de séjour de 2 à 4s. La post-combustion peut être classée en trois types selon la direction d'écoulement : horizontal, courant vertical vers les haut ou courant vertical vers le bas. Ces différents types sont représentés sur la figure ci-dessous.

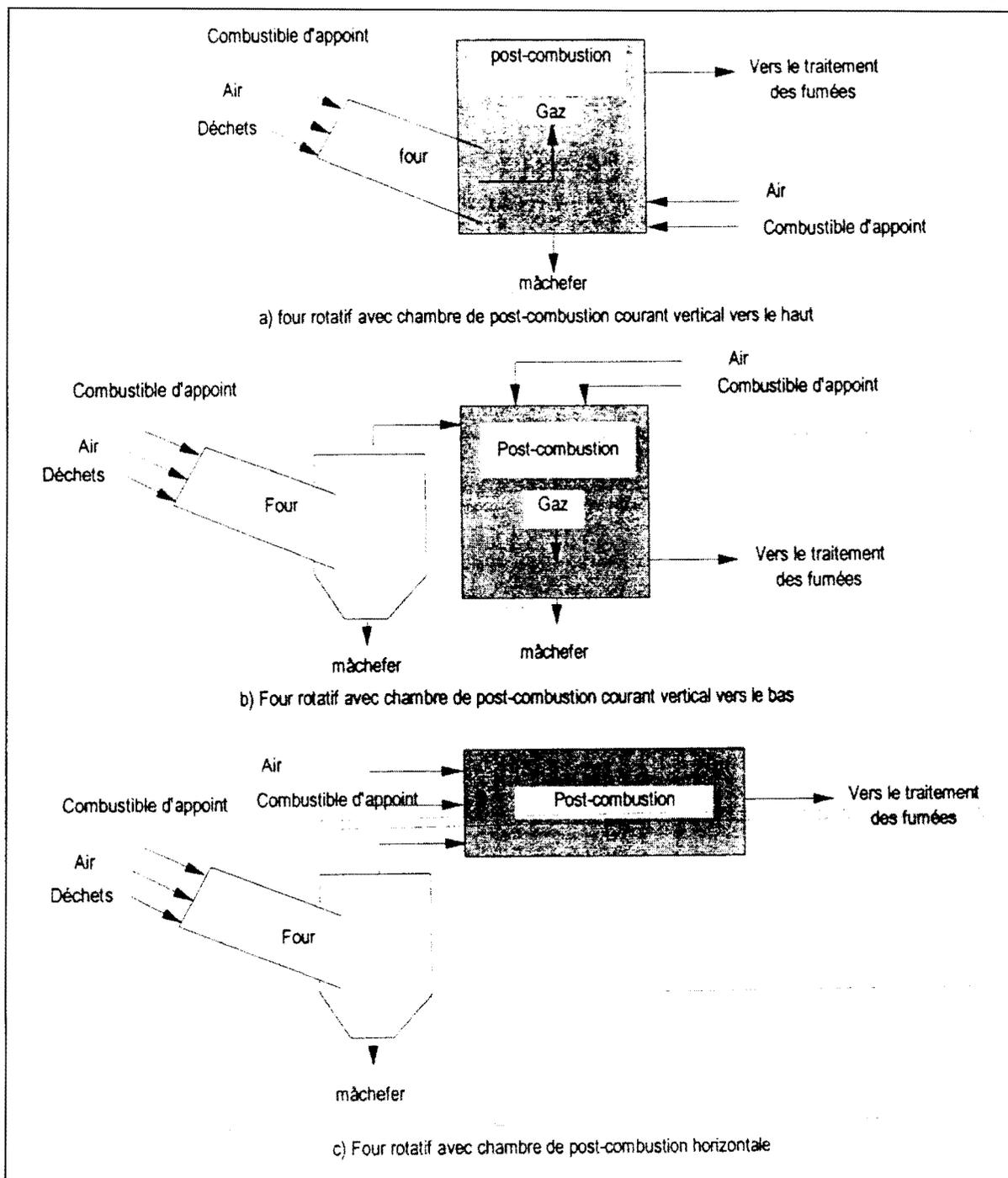


Figure 16 : Différents types de chambre de post combustion (KERDSUWAN)

1.7.3. Les régimes de fonctionnement d'un four rotatif

La nature des flux des solides peut considérablement changer avec les caractéristiques des particules, les dimensions du four, la vitesse de rotation et le taux de remplissage [33]. HEINEN & al.[35] ont fait une étude intéressante de ce problème. Ils ont introduit le concept du « diagramme d'état du lit ». Ce diagramme est spécifique à un matériau donné. Pour des fours rotatifs ayant un lit peu profond, les

Jean Fidèle NZIHOU Thèse Doctorat Unique Université de Ouagadougou 45

déchets ont tendance à glisser entre les parois du four et le lit solide. Pour des des lits plus profonds, les déchets peuvent soit « rouler » (rolling), soit « chuter » (slumping) pour des vitesses de rotation plus faibles. En régime « slumping », l'angle de repos des déchets croit pendant la rotation du lit solide, jusqu'à ce que les déchets chutent et reviennent au repos dans le lit solide. Ce processus se répète périodiquement et est moins désirable que le régime du « rolling » pour le transfert de masse. Dans le mode rolling la surface du lit est continuellement renouvelée, alors que dans le mode slumping, le renouvellement du lit a lieu à des intervalles fixés.

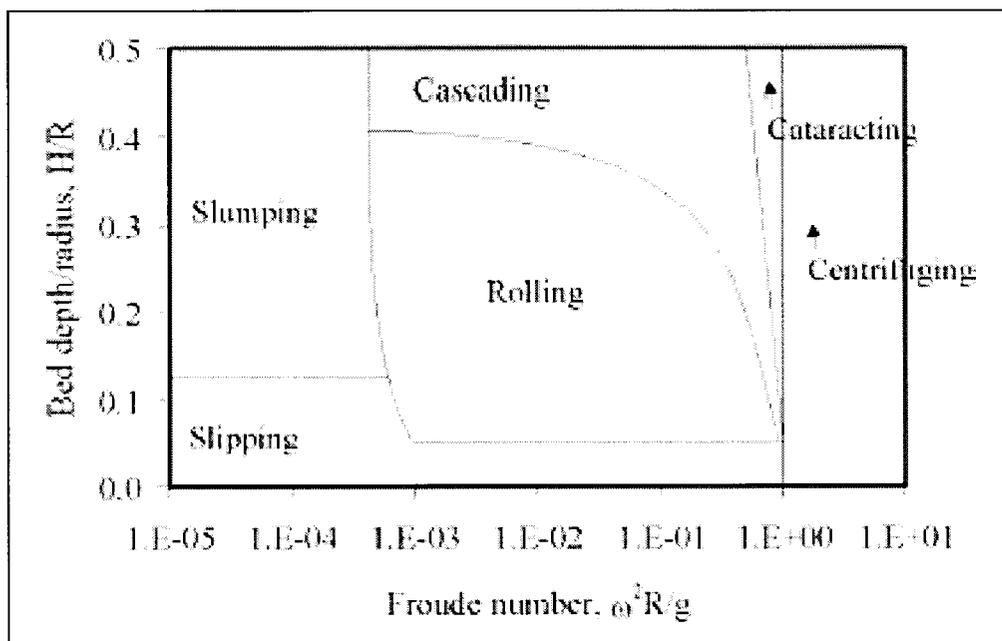


Figure 17 : Diagramme d'état du lit solide (d'après Heinen & al.)

1.7.4. Temps de séjour des solides dans un four rotatif

Des formules empiriques ont été proposées pour décrire le déplacement transversale de la matière dans un cylindre en rotation. P.S KOCHAR [36] propose la formule suivante :

$$V_s = \frac{\omega_m \cdot D}{0.308(\theta + 24.0)}$$

V_s est la vitesse de déplacement des solides, ω_m la vitesse angulaire de rotation, θ l'inclinaison du four. Si L est la longueur du four nous en déduisons le temps de séjour dans le four par la relation $T = L/V_s$, d'où

$$T_s = \frac{0.308(\theta+24.0).L}{\omega_m .D}$$

TILMAN & al. [37] proposent le temps de séjour suivant :

$$T_s = \frac{1.77L.\alpha.O}{\omega_m .D.\theta}$$

L est la longueur du four, α l'angle de repos des déchets solides en degrés, O un facteur compensatoire lié à la présence d'obstacles dans le four. Idéalement ce dernier paramètre vaudra 1. Mais avec la présence des obstacles dans le four il peut descendre à 0.5

SEAMAN [38], cité par GERMAN [39] propose une formule semblable

$$T_s = \frac{L.\alpha.f_1(\alpha)}{\omega_m .D.f_2(\theta)}$$

1.7.4 Les modèles de transfert de masse dans un four rotatif.

Il existe deux modèles [³⁴] :

- Les « Balance models » : ils reposent sur un élément de base, le « stirred reactor ». Ces modèles ne considèrent pas les détails de transport des solides dans le réacteur, mais spécifient les valeurs caractéristiques tel que le temps de séjour dans le four à partir des considérations géométriques et/ ou les relations obtenues par expérimentation. Ces modèles sont aussi appelés modèles globaux ou modèles du corps noir.
- Les modèles du « maximum de gradient » : ces modèles partent des « balance models » et les connectent en série pour donner les relations liant les réacteurs les uns aux autres.

1.8. Conclusion

Une gestion efficace des déchets doit mettre en œuvre des voies complémentaires. Le développement des syndromes NIMBY (Not In My Back Yard) « Pas de cela chez moi » et NIMEY (Not In My Election Year) « Pas dans l'année de mon élection », conjugués avec les normes environnementales plus strictes vont faire baisser la davantage la part de l'enfouissement simple des déchets. Quelques considérations de coût sont jointes en annexe n° 1.

L'incinération aura donc un grand rôle à jouer dans la gestion des déchets. Dans le contexte du Burkina Faso, l'incinération dans un four thermique rotatif semble bien adaptée. Mais l'incinération sera plus efficace si on la conjugue avec un tri en amont, ce qui permet par exemple de valoriser les déchets organiques, brûler les déchets avec bon pouvoir calorifique, avec éventuellement récupération d'énergie et de n'enfouir que les déchets ultimes.

Chapitre 2 : Modèle de la fraction combustible du déchet ménager de la ville de Ouagadougou

2.1. Introduction

Afin de garantir la reproductibilité de nos expériences pour la validation de nos modèles, nos expériences seront réalisées avec un déchet type, reconstitué à partir de la composition des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou. Le modèle proposé est à la fois simple, facilement utilisable et assez fiable et représentatif. Il faut donc trouver un compromis entre la prise en compte de toutes les composantes du déchet qui est impossible, et une trop grande simplification qui ôterait au modèle sa représentativité. Après avoir donné une composition en différents constituants du déchet modèle, nous allons calculer les proportions des constituants élémentaires du déchet modèle afin de proposer une formule brute approchée de ce déchet.

2.2. Le modèle.

Les déchets ménagers sont d'une composition variable suivant les saisons et les lieux de leur production. Dans le cas d'une région ou une ville, trouver une composition représentative du déchet nécessite des campagnes de caractérisation de ces déchets suivant les saisons, afin d'obtenir un modèle statistiquement valable.

Les toutes premières campagnes de caractérisation expérimentale des déchets de la ville de Ouagadougou ont été réalisées par le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement. La première étude a été réalisée par Mélanie PROUST [40] en avril 2001 et Jacques TEZANOU [41].

De cette étude il ressort la composition suivante des déchets ménagers de Ouagadougou :

Tableau 4 : pourcentages en masse des différents composants par rapport à la masse totale du déchet.

Composantes	Ville de Ouagadougou	Moyenne française [42]
Fermentescibles	39.50	28.8
Papiers	8.56	25.3
Textiles	5.82	5.7
Plastiques	9.56	11.1
Métaux	4.18	4.1
Verre	2.73	13.1
Spéciaux	1.59	0.5
Composites N.C.	4.54	3.2
Incombustibles N.C.	18.49	6.8
Composites	4.02	1.4
Total	100	100

L'examen de ce tableau montre que les constituants les plus importants des déchets ménagers de Ouagadougou sont : les fermentescibles, les incombustibles non classés, les plastiques, les papiers et les textiles. Les autres constituants ne dépassent pas 5% de la masse totale.

Pour la modélisation, un certain nombre d'hypothèses sont faites :

- les fermentescibles sont assimilés au bois car chimiquement leur constitution est très proche de ce dernier (lignocellulosique) ;
- les papiers sont assimilés au carton ;
- le plastique est considéré comme formé à 91% de polyéthylène téréphtalate (P.E.T) et à 9% de polyamide 6-6 (P.A.) ;
- les textiles et textiles sanitaires sont assimilés au carton ;
- les spéciaux sont assimilés au plastique ;
- les combustibles non classés sont assimilés pour moitié au bois et pour moitié au plastique ;

- les composites sont assimilés moitié au carton et autre moitié au plastique ;
- les incombustibles ne sont pas pris en compte car ils ne sont presque pas valorisables. On s'efforce autant que faire se peut de les mettre à part (tri en amont) dans la gestion des déchets. De plus, de part leur nature incombustible, ils ne participent pas aux réactions chimiques qui ont lieu pendant l'incinération des déchets. De plus nous ne prendrons en compte que la fraction combustible des déchets ;
- les métaux et le verre ne sont pas pris en compte car il s'agit de la catégorie des déchets présentant des dangers tant pour la santé de l'homme que pour l'environnement ; ils doivent être l'objet d'un traitement approprié.

D'où la répartition en masse suivante :

Tableau 5 : composition modèle du déchet ménager de la ville de Ouagadougou.

Composantes	Composition modèle du déchet			
	Bois	Carton	Plastique	Total
Fermentescibles	39.50	---	---	39.50
Papiers	---	8.56	---	8.56
Textiles	---	5.82	---	5.82
Plastiques	---	---	9.56	9.56
Métaux	---	---	---	4.18
Verre	---	---	---	2.73
Spéciaux	---	---	1.59	1.59
Composites N.C.	---	2.27	2.27	4.54
Incombustibles N.C.	---	---	---	18.49
Composites	---	2.01	2.01	4.02
Total	39.5	18.86	15.43	100

De ce qui précède, nous arrivons aux proportions par rapport à la fraction combustible suivante :

Tableau 6 : proportions des composantes du déchet modèle.

	Bois	Carton	P.E.T.	Polyamide 6-6	Total
Masse	39.5	18.86	14.02	1.41	73.79
Proportion	53.53	25.56	19.00	1.91	100.00
Pourcentage	53.5%	25.5%	19%	2%	100.0%

Par comparaison, le déchet modèle des ordures ménagères françaises utilisé par T. ROGAUME [54] est le suivant :

- Bois : 41%
- Carton : 37%
- P.E.T. : 19%
- Polyamide 6-6 : 3%.

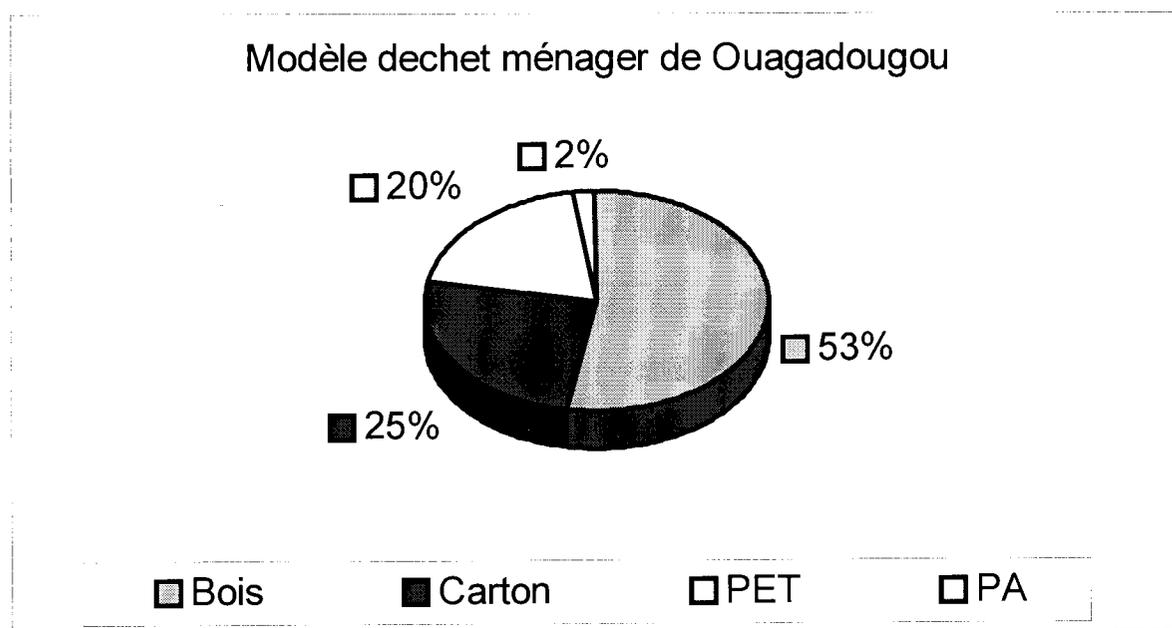


Figure 18 : Proportions de matériaux combustibles dans le déchet ménager de la ville de Ouagadougou.

2.3. Composition élémentaire de la fraction combustible du déchet modèle:

La composition élémentaire de la fraction combustible du déchet modèle sera déduite des compositions élémentaires du bois, du carton et du plastique.

2.3.1. Composition élémentaire du bois.

Selon ROBERT [43] et DUMON [44], le bois est essentiellement composé de trois polymères : la cellulose, les hemicelluloses et la lignine, ainsi que des matières organiques, de la potasse, la silice, etc.

- La cellulose représente 40 à 50% de la composition du bois. C'est un polymère linéaire composé majoritairement de d-glucose ($C_6H_{10}O_5$).
- L'hemicellulose complète cette composition pour 30 à 50%. Ce sont des polymères branchés avec du d-xylose ($C_5H_{10}O_5$). et du d-manose ($C_6H_{12}O_6$).
- La lignine à raison de 24 à 30% parachève la composition du bois.

La répartition de ces différents constituants varie en fonction des différents bois et surtout de leurs essences. Le tableau suivant dû à BEAUMONT [45] le met en évidence.

Tableau 7 : Répartition des constituants du bois selon les essences.

Polymères	Feuillus	Résineux
Cellulose	40	40
Hemicellulose	34	26
Lignine	21	27
Autres substances	5	7

La répartition de ces différents constituants varie en fonction des différents bois et surtout de leurs essences. Le tableau suivant dû à BEAUMONT [45] le met en évidence.

Tableau 8 : Répartition des constituants du bois selon les essences.

Polymères	Feuillus	Résineux
Cellulose	40	40
Hemicellulose	34	26
Lignine	21	27
Autres substances	5	7

Le bois est donc essentiellement composé de structures aromatiques. Les cendres du bois sont majoritairement constitués de sels minéraux. Il se distingue par son hétérogénéité et sa complexité. Il est très riche en matières volatiles, de l'ordre de 73 à 87%, en oxygène. La proportion de carbone fixé dans le bois est de 13 à 26%, selon ZHOU [46]. La composition pondérale du bois sec change avec l'essence, mais varie peu en fonction des parties de l'arbre comme présenté ci-dessous :

Tableau 9 : Composition pondérale moyenne du bois en fonction de sa nature [46].

Composants	Bois tendres		Bois durs	
	Cèdre	Sapin	Hêtre	Chêne blanc
Carbone (C)	48.8	52.3	51.64	50.44
Hydrogène(H)	6.37	6.3	6.26	6.59
Soufre (S)	--	--	--	--
Oxygène (O)	44.46	40.5	41.45	42.73
Azote (N)	--	0.1	--	--
Cendres	0.37	0.8	0.65	0.24

On constate que les écarts de compositions sont relativement faibles entre les différents types de bois. Mais la composition pondérale du bois varie selon les auteurs. Le tableau suivant l'illustre pour le bois de sapin.

Tableau 10 : Composition pondérale moyenne du bois de sapin de deux auteurs.

Nature	DUMON (1982)	BEAUMONT (1986)
Carbone	49.5	50.9
Hydrogène	6.0	5.76
Oxygène	43.0	42.1
Azote	0.5	0.2
Soufre	--	0.04
Cendres	1.0	1.0

Nous retiendrons, tout comme Thomas ROGAUME, la composition donnée par BEAUMONT.

2.3.2. Composition élémentaire du carton [54].

Le carton est constitué de près de 90% de cellulose. L'hémicellulose en forme 2%, la lignine près de 2% aussi. Cette composition varie légèrement selon les différents types de carton (carton assemblé par pression, carton moulé, carton ondulé). T. ROGAUME [54], indique que la composition centésimale moyenne observée dans la littérature est la suivante:

Carbone:	43,7%	Azote:	0,1%
Hydrogène:	5,8%	Soufre:	0,2%
Oxygène:	44,9%	Cendres:	5,3%

2.3.3. Composition élémentaire du PET [54].

Les plastiques se répartissent en trois familles: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères. Les thermoplastiques peuvent être mis en forme sous l'effet de la chaleur de façon réversible. Le PET constitue la majeure partie des plastique qu'on retrouve dans les déchets ménagers (91%). Il appartient à famille des

thermoplastiques. Sa composition pondérale moyenne obtenue dans la littérature [54] est la suivante:

Carbone:	59,7%	Azote:	0,06%
Hydrogène:	14,2%	Soufre:	0,04%
Oxygène:	24,8%	Cendres:	1,2%

La composition élémentaire de ces trois principaux constituants des déchets ménagers est donnée ci-dessous [46] :

Tableau 11 : Analyse élémentaire des matières sèches.

Nature du combustible	C%	H%	N%	O%	S%	Cendres %
Bois	50.9	5.76	0.2	42.1	0.04	1
Carton	43.73	5.7	0.09	44.93	0.21	5.34
Plastique (P.E.T.)	84.54	14.18	0.06	0	0.03	1.19

Le tableau 11 ci-dessous présente les résultats d'analyse des différents combustibles et autres caractéristiques thermiques physiques [47, 48, 49, 50] :

Tableau 12 : Composition globale des différents combustibles et pouvoir calorifique inférieur.

Nature du combustible	C fixe %	Matières volatiles %	PCI (kJ/kg)
Bois	18	81	18900
Carton	12.94	81.74	17100
Plastique (P.E.T.)	0.07	98.74	41380

2.4. Formule brute approchée de la fraction combustible du déchet modèle de la ville de ouagadougou.

Les différents constituants du déchet modèle que sont le bois, le carton et le plastique sont essentiellement composés d'atomes de carbone, d'azote, d'hydrogène et d'oxygène. Nous allons établir une formule brute approchée de ce déchet modèle en

négligeant les cendres. En effet bien que les cendres représentent jusqu'à 5.34% dans le carton, elles ne seront pas prises en compte puisqu'il s'agit d'un mélange demandant une analyse. Pour bien faire, il aurait fallu effectuer une analyse chimique élémentaire de la fraction combustible du déchet ménager de Ouagadougou. Mais le LPCE n'est pas encore équipé pour de telles analyses, la formule proposée sera donc provisoire et approximative. Elle devra être affinée plus tard lorsque les moyens expérimentaux mis à disposition le permettront.

Nous allons prendre les résultats de l'analyse élémentaire de *ROGAUME T.et all [54]*. On se résume donc au tableau suivant des principaux constituants atomiques simples du déchet modèle :

Tableau 13 : Constituants significatifs détaillés du déchet modèle.

Nature du combustible	C%	H%	N%	O%	S%
Bois	50.9	5.76	0.2	42.1	0.04
Carton	43.73	5.7	0.09	44.93	0.21
Plastique (P.E.T.)	59.7	14.2	0.06	24.8	0.04

On trouve donc dans le mélange :

Tableau 14 : Apports en proportionnels en carbone, hydrogène, azote, oxygène et soufre du bois, du carton et du plastique.

Elément	Carbone	Hydrogène	Azote	Oxygène	Soufre
Bois	50.9	5.76	0.2	42.1	0.04
Carton	43.73	5.7	0.09	44.93	0.21
Plastique	50.7	14.2	0.06	24.8	0.04
Masse atomique	12	1	14	16	32

Dans le déchet ménager de la ville de Ouagadougou, on trouve : 53,5% de bois, 25,5% de carton et 21% de plastique, on a donc :

Tableau 15 : Nombre de moles d'atomes des constituants du déchet modèle.

	Carbone	Hydrogène	Azote	Oxygène	Soufre
Bois (53,5%)	2,26929	3,08160	0,00764	1,40772	0,00067
Carton (25,5%)	0,92926	0,12113	0,00191	0,95476	0,00446
Plastique (21%)	1,04475	2,96520	0,00090	0,32550	0,00026
Total de moles	4,24330	6,16793	0,01046	2,68798	0,00539

D'où la formule « brute » de la fraction combustible du déchet ménager de Ouagadougou : $C_{4,24} H_{6,16} O_{2,69} N_{0,01} S_{0,005}$

On peut donc prévoir que :

- La combustion du déchet ménager aura les composés de carbone et d'hydrogène comme dominantes.
- On peut ignorer la contribution du soufre à la combustion.

2.5. Conclusion

Le modèle proposé ne tient compte que de la fraction combustible du déchet ménager. Cette limitation se justifie par le fait qu'il serait inconséquent de brûler les métaux : ils se retrouveront dans l'atmosphère et/ou les mâchefers. Le verre et les incombustibles non classés comportant par exemple des gravats n'ont pas vraiment besoin d'être brûlés. On doit les enlever en amont et n'incinérer que ce qu'il faut. Toutefois, on ne pourrait éviter certains incombustibles non classés dans la combustion du déchet réel. Ils devront donc être pris en compte afin de valider un modèle de la combustion du déchet ménager de la ville de Ouagadougou. Cela reviendra à résoudre les problèmes dus aux mâchefers que produira cette combustion du déchet réel. Il serait souhaitable que cette formule brute du déchet modèle de Ouagadougou soit déduite des analyses chimiques faites au sein même du LPCE, lorsque cela sera possible.

Chapitre 3 : Description du dispositif expérimental

3.1. Introduction

Ce chapitre décrit en détail le four rotatif ainsi que les équipements annexes qui lui sont associées, y seront aussi décrits les dispositifs et logiciels d'acquisition et de traitement des données.

3.2. Description du four thermique rotatif

Un ensemble de traitement des déchets par four thermique rotatif est constitué d'un four auquel sont ajoutés des équipements connexes destinés à la réception, la manutention des déchets et à la manipulation des résidus des déchets. Un tel ensemble est souvent muni d'un système de récupération d'énergie lorsque la taille de l'installation est suffisante.

Le prototype que nous utiliserons pour nos recherches est du type co-courant dans lequel le fioul, combustible d'appoint, l'air et le combustible (déchets) sont introduits du même côté. Il a été fabriqué par la société Italienne EQUADOR et comprend quatre éléments principaux : la chambre de combustion, la chambre de post combustion, la cheminée et le boîtier de pilotage comme le montre la figure ci-dessous.

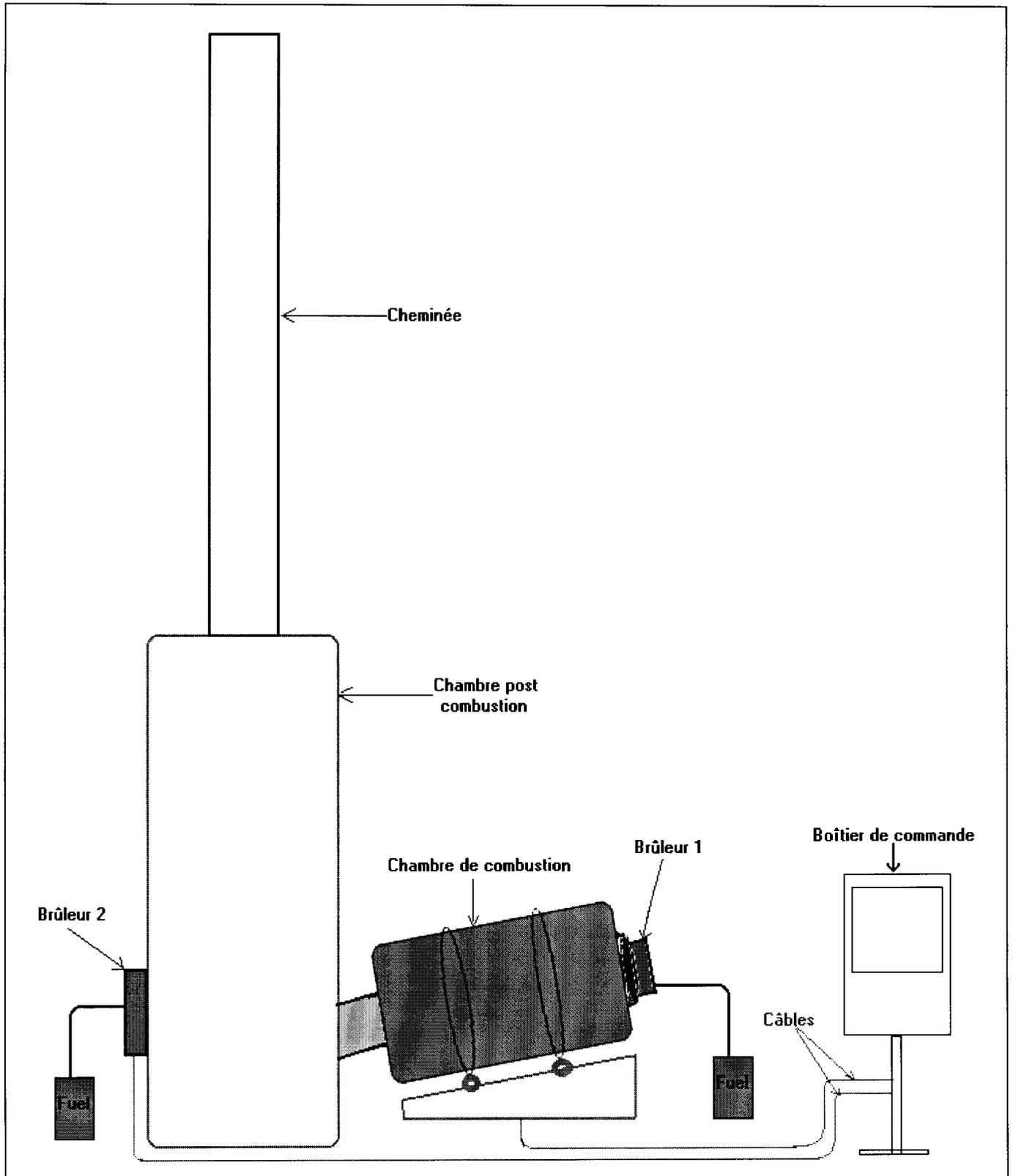


Figure 19: schéma d'ensemble du four rotatif utilisé pour l'étude.

3. 2. 1. La chambre de combustion :

C'est un cylindre légèrement incliné, muni d'un brûleur d'air primaire que nous avons noté brûleur 1. Ce cylindre d'un diamètre de 88 cm, mesurant 108 cm de longueur, est suspendu sur des roulements à billes qui autorisent sa rotation autour de son axe de symétrie. La figure ci-dessous en détaille la constitution :

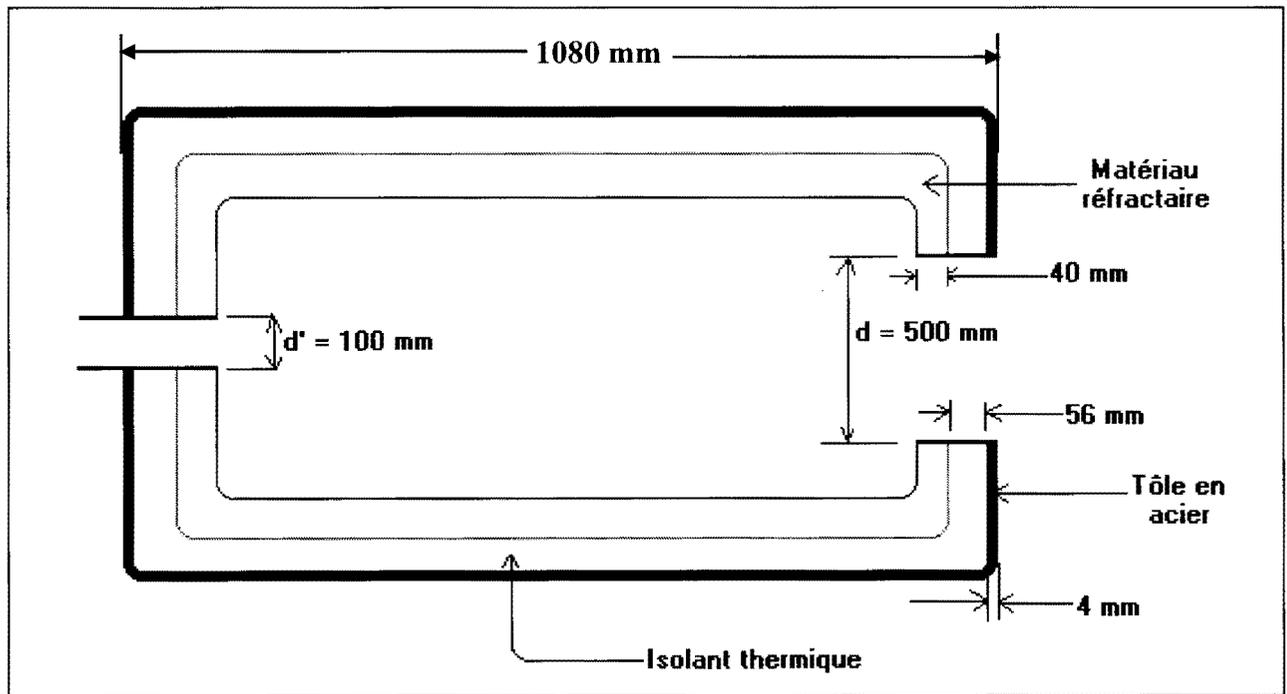


Figure 20 : Coupe verticale de la chambre de combustion.

On trouve de l'intérieur à l'extérieur, selon une coupe verticale :

- le réfractaire : d'une épaisseur de 4 cm, il doit supporter les températures élevées mises en jeu dans le four. Etant en contact direct avec les gaz chauds dans sa partie supérieure et en contact avec le lit solide dans sa partie inférieure ; le matériau réfractaire subit d'importantes variations de température. Il doit donc pouvoir supporter d'importants chocs thermiques ;
- l'isolant thermique : il sert à limiter les pertes de chaleurs et contribue à maintenir la température globale du four autour de certaines valeurs moyennes ;
- la tôle en acier : elle confère une bonne rigidité mécanique à l'ensemble.

Sur la porte du cylindre est fixée le brûleur primaire de type Riello Gulliver RG1 dont les caractéristiques [51] sont :

- brûleur de fioul domestique, viscosité maximale à 20°C : 6mm²/s ;
- alimentation électrique monophasée, 50 Hz, 230 ± 10% ;
- moteur électrique de 170 W / 0,85 A et 2750 tours/minute ;
- contrôle de flamme par cellule photorésistante (en cas de problème, le brûleur est automatiquement arrêté) ;
- puissance minimale : 21 kW ;
- puissance maximale : 60 kW ;
- débit massique minimal du fioul : 1,8 kg/h;
- débit massique maximal du fioul : 5kg/h
- pression de la pompe de fioul : 8 à 15 bar.

L'image de ce brûleur est sur la figure ci-dessous (à gauche) :

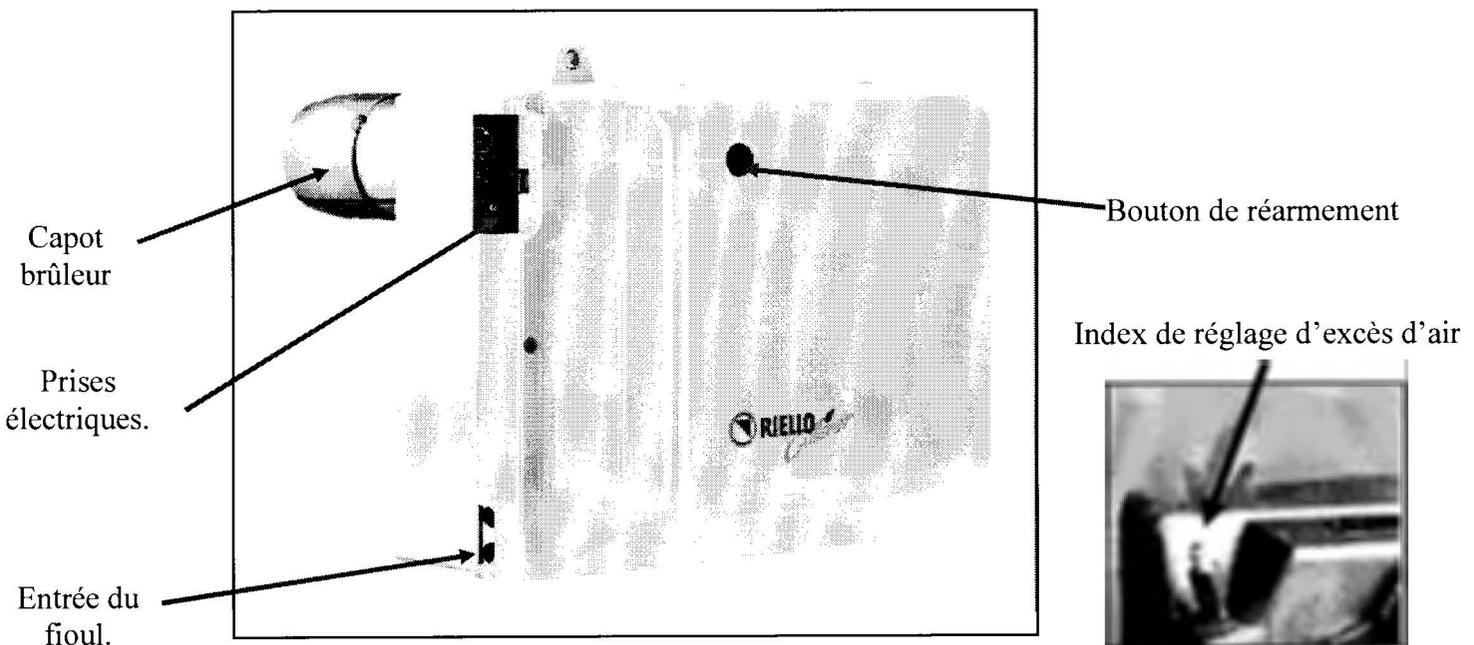


Figure 21 : Le brûleur primaire Riello Gulliver RG1.

L'entrée d'air primaire se fait en bas du brûleur, est contrôlée par le moteur. L'air secondaire peut être injecté au moyen d'un orifice disponible sur la porte. L'excès d'air primaire est réglable à l'aide d'un index accessible de l'extérieur du brûleur (figure 21, à droite). Selon la puissance de fonctionnement voulue, le

manuel technique [52] recommande de régler l'excès d'air selon la plage de travail suivante :

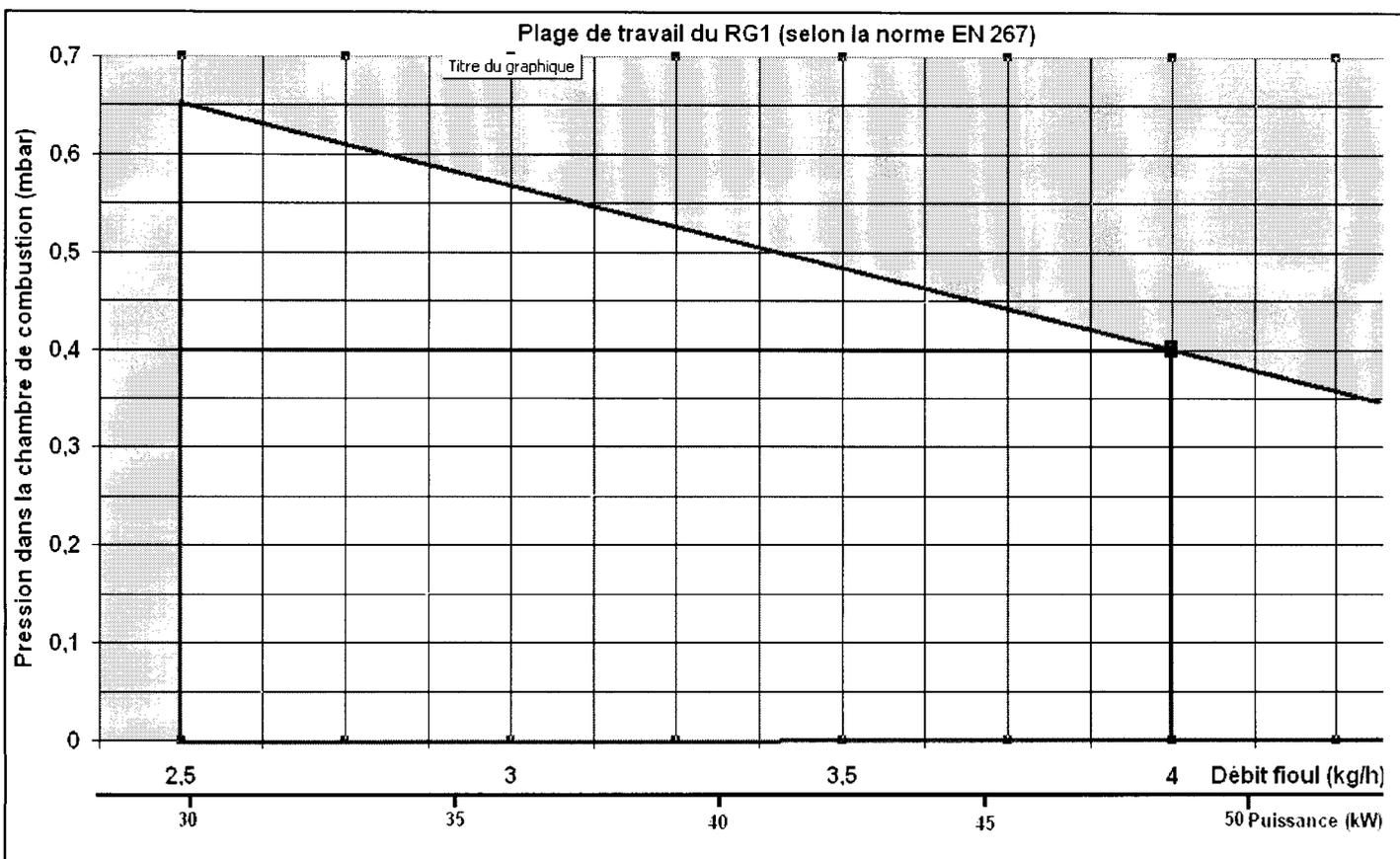


Figure 22 : Plage de travail du brûleur primaire RG1 (extrait de la notice technique Riello Gulliver).

La puissance de fonctionnement est déterminée par le débit massique du brûleur, lui-même déterminé par le gicleur utilisé. Conformément à la Directive rendement 92/42/CEE, il faut déterminer le gicleur, la pression de la pompe du fioul, le débit du brûleur, le réglage de la tête de combustion et le réglage du volet d'air primaire selon le tableau 17 ci-dessous :

Tableau 16 : Réglages préconisés pour le brûleur primaire en fonction du gicleur (source : notice technique du brûleur RG1).

Gicleur	Pression pompe	Débit brûleur	Réglage tête de combustion	Réglage volet d'air
GPH (à 60°)	Bar	Kg/h \pm 4%	Index	Index
0,65	12	2,7	2,5	1,5
0,75	12	3,0	3	2,9
0,85	12	3,4	3,5	4,2
1,00	12	4,0	4	5,6
1,10	12	4,4	4	6,3
1,10	15	5,0	4	6,7

Nous avons utilisé un gicleur GPH 1,00, le débit de combustible du brûleur primaire est donc de $(4 \pm 0,16)$ kg/h. Le réglage de la tête de combustion doit donc être à l'index 4, le réglage du volet d'air à l'index 5,6 ; on déduit alors sur la figure 22, la puissance thermique produite par le brûleur primaire : 48,6 kW.

3. 2. 2. La chambre de postcombustion

Elle a pour rôle de limiter les émissions polluantes dans l'atmosphère. Celle utilisée ici est du type courant vertical vers le haut (figure 23). C'est un cylindre en acier mesurant 324 cm de hauteur et 88 cm de diamètre. Il est muni d'un brûleur au fuel de même type que celui de la chambre de combustion décrit ci-dessus, mais de puissance plus élevée, et d'une porte pour l'extraction des cendres et mâchefers par le bas figure ci-dessous.

Le brûleur de postcombustion est de type Riello Gulliver RG 4 S, consommant entre 10 et 20 kg de combustible par heure et fournissant une puissance de 118,5 à 237 kW. Un diaphragme de 50 cm de diamètre extérieur permet de recevoir les gaz et cendres venant de la chambre de combustion au travers d'un trou circulaire d'environ 10 cm de rayon. Le brûleur est alimenté en gas-oil à partir d'un petit réservoir qui est au pied de la chambre de postcombustion.

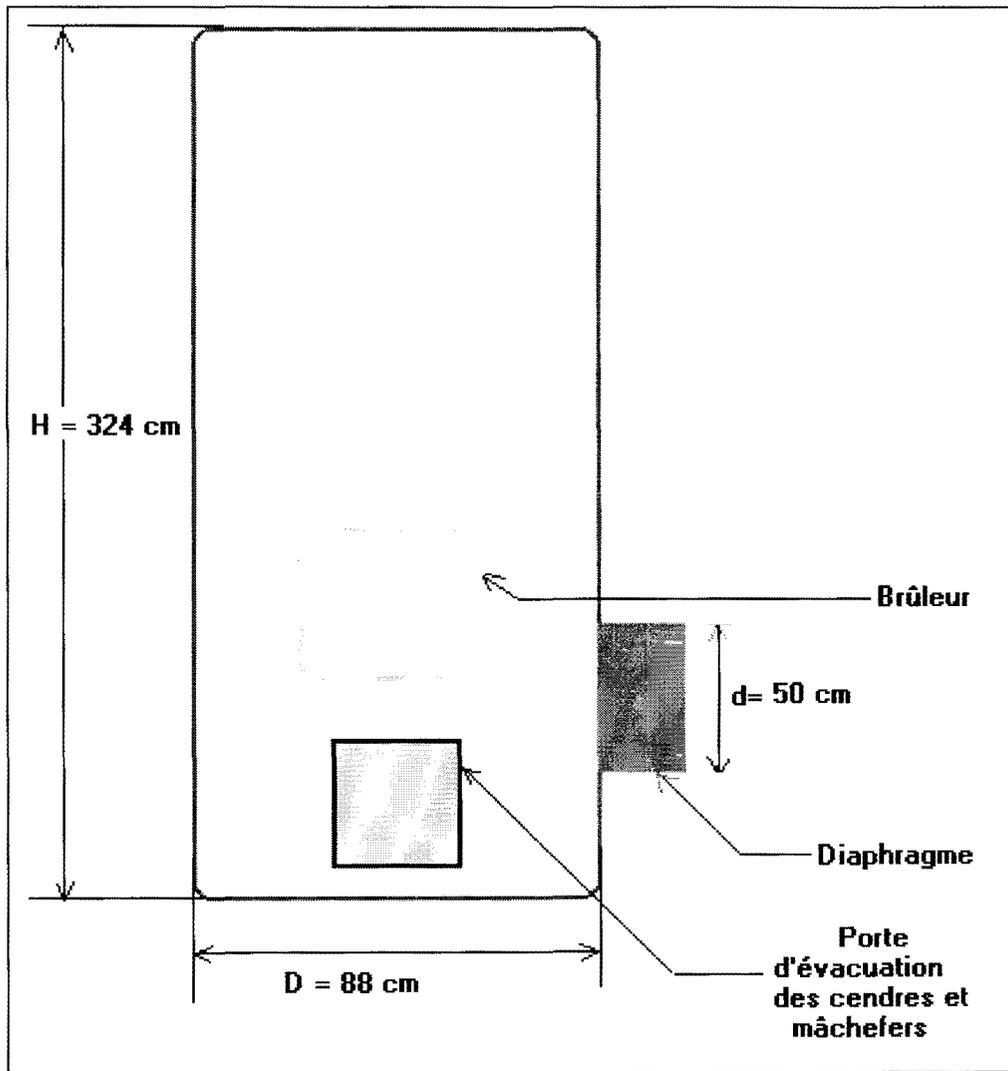


Figure 23 : La chambre de post combustion.

3. 2. 3. La cheminée

C'est un cylindre d'environ 40 cm de diamètre à la base et de plus de 5m de hauteur. Il a pour rôle d'une part de refroidir les fumées et d'autre part de les disperser dans l'atmosphère.

3. 2. 4. Le boîtier de commande

Il comporte les éléments suivants :

- **Line A Insert A** : Témoin lumineux de la mise sous tension du four.
- **ON / OFF** : commutateur ; marche / arrêt.
- **Tempo cyclo** : sélecteur à interrupteurs et cadran à aiguille, indicateur de la vitesse de rotation du four rotatif.
- **Tempo bruciatore 1** : durée de fonctionnement du brûleur primaire, exprimée en minutes et secondes.
- **Tempo bruciatore 2** : durée de fonctionnement du brûleur postcombustion, exprimée en minutes et secondes.
- **Rotazione SX / DX** : sélecteur du sens de rotation du cylindre ; SX = sens trigonométrique, DX = sens anti-trigonométrique.
- **Bruciatore 1** : voyant lumineux de fonctionnement du brûleur primaire.
- **Bruciatore 2** : voyant lumineux de fonctionnement du brûleur postcombustion.
- **Rotazione Man / Auto** : sélecteur de la commande de la rotation du cylindre. Man = manuelle, Auto = automatique.
- **Bruciore 1** : bouton d'allumage / arrêt du brûleur primaire.
- **Bruciore 2** : bouton d'allumage / arrêt du brûleur postcombustion.

3.3. Les thermocouples et le boîtier de centralisation

Les températures sont captées dans le four par un ensemble de thermocouples de type K disposé dans le four le long d'un tube d'acier. Ils sont prolongés jusqu'au boîtier de centralisation par un câble de compensation à faibles pertes. Le boîtier de centralisation est relié à une carte DAS / TC B construite par la société KEITHLEY qui est directement insérée dans le PC d'acquisition.

3.4. L'analyseur des gaz de combustion

C'est un analyseur de gaz construit par la société Testo ayant la référence « Testo 350 ». Il permet de mesurer en continu les concentrations en O₂, CO₂ et CO dans un gaz, de déterminer la pression différentielle et les concentrations en NO, NO₂ et SO₂. Il est constitué d'un tube sur lequel est montée la cellule de mesure des gaz, qui est raccordé au système de base par des câbles et tubes flexibles. Ses principales capacités de mesure sont les suivantes :

Tableau 17 : Caractéristiques du Testo 350. Source : mode d'emploi du testo350.

Températures	- 40 + 1 200 °C
Tirage ou pression	+/- 50 hPa
O ₂	021 % Vol.
Calcul CO ₂	0.....CO ₂ max
Rendement	0.....120 %
Pertes	0.....99%
Facteur d'air	1.00 à 20.0
CO	040 000 ppm
NO	0.....3 000 ppm
NO ₂	0.....500 ppm
SO ₂	0.....5 000 ppm
Humidité ambiante	0.....100% HR
Pression différentielle	100 hPa

3. 4. Le PC d'acquisition et le logiciel Testpoint

3. 4.1. Le Pc d'acquisition

Au cœur de notre dispositif expérimental se trouve un ordinateur de type « Tour », muni d'un processeur AMD-K6/2 cadencé à 450Mhz, doté de 63 Mo de Ram et d'un disque dur de 7,82 Go. Il tourne sous Windows 98. Il comprend une carte d'acquisition analogique digital de type DAS-TC/B construite par la société KEYTHLEY. La carte DAS-TC/B reçoit les températures qui lui sont présentées sur une des extrémités d'un câble S-1800. L'autre extrémité du câble S-1800 est enfichée sur le boîtier de centralisation des températures.

Le boîtier de centralisation des températures est un « Clear Signal® Mx 2000 » de marque INMAC®. Il comporte deux entrées pour les cartes DAS-TC et une entrée pour une carte DAS 1402. On peut y brancher jusqu'à 32 thermocouples. Elle comporte aussi 08 entrées « bananes femelles ». Les thermocouples sont connectés à ce boîtier via un câble de compensation.

Les données provenant du Testo 350 arrivent par le port série de ce PC (figure 24).

3. 4.2. Le logiciel Testpoint [52]

Les données issues de la combustion des gaz ainsi que les températures dans le four sont traitées par le logiciel Testpoint.

A. Présentation

Testpoint est un logiciel permettant de créer des applications de test personnalisées et de faire des mesures et les acquisitions des données. Ce logiciel comporte des fonctions pour le contrôle des appareils extérieurs au système, la création des interfaces utilisateurs, le traitement et l'affichage des données, l'établissement des fichiers de rapport et l'échange des informations avec les autres programmes sous Windows.

Testpoint permet de programmer sans avoir à apprendre un langage de programmation. Avec Testpoint, programmer revient seulement à sélectionner les

objets qui modélisent les différents éléments d'une application, puis d'assembler les actions à effectuer à l'aide de la fonction « déplacer et déposer » de la souris.

Testpoint est un logiciel puissant et souple. Il possède un ensemble de fonctions contrôlant le déroulement du programme, accès au matériel relié au PC de l'utilisateur, des cartes d'ajout (add-on) et des liaisons d'échanges avec d'autres programmes.

B. Fonctionnalités

Testpoint peut assurer les tâches suivantes :

B.1. Contrôle d'un instrument.

- Bibliothèque d'une centaine d'appareils parmi les plus usuels.
- Compatibilité aux normes GPIB (IEEE-488), RS 232 et RS 485.
- Compatibilité VXI, via les contrôleurs GPIB.

B.2. Acquisition des données.

- Accepte les entrées/sorties analogiques et numériques (A/N, N/A), ainsi que les ports d'entrées/sorties particuliers.
- Acquisition analogique/numérique (A/N) rapide en tâche de fond.
- Représentation graphique à défilement, affichage par barres numériques.
- Seuils d'alarme, acquisition continue sur disque.

B.3. Analyse.

- FFT (Fast Fourier Transform), filtrage numérique, lissage.
- Approximation de courbes, interpolation, régression polynomiale.
- Statistiques incluant moyenne, écart-type, valeur médiane, histogrammes, etc.
- Vecteurs et matrices, y compris inversion, déterminant, etc.

B.4. Présentation et comptes rendus.

- Graphiques, bar graphes, affichage numérique et analogique (par barres).
- Indicateurs et images en bitmap, création de rapport imprimé.

B.5. Interface utilisateur.

- Boutons, commutateurs, sélecteurs, commandes à glissière, champs d'entrées.
- « Panels » multiples, fonctionne avec les commandes standard de l'industrie.

B.6. Echange dynamique de données/Liaison objet et inclusion.

- Emission et réception des valeurs numériques, texte et diagrammes vers les tableurs, traitement de texte, bases de données et programmes mathématiques.
- Affichage de graphiques et d'images traitées par d'autres applications.

C. Utilisation de Testpoint

- Il faut commencer par déplacer les objets de Testpoint tels que les boutons, affichages, graphes, appareils GPIB, cartes A/N, etc., qui apparaissent dans le « Stock » vers l'espace de travail de l'application ou « panel » (A : figure 24.0).
- Ensuite déplacer les objets dans une liste d'actions (B/ figure 24.0).
- Enfin choisir les actions à exécuter dans une liste de menus.

Dans la liste d'actions on peut modifier l'ordre des actions, les éditer ou les supprimer. Il n'y a aucune tâche associée qui soit en langage conventionnel. Il n'y a pas non plus de variables à déclarer, pas de longues commandes à taper. Il suffit de suivre à la lettre les « mots clés » et d'observer la syntaxe.

Deux captures d'écran de ce logiciel Testpoint sont présentées sur la figure 24 : l'une pour le four rotatif et l'autre pour le PCI.

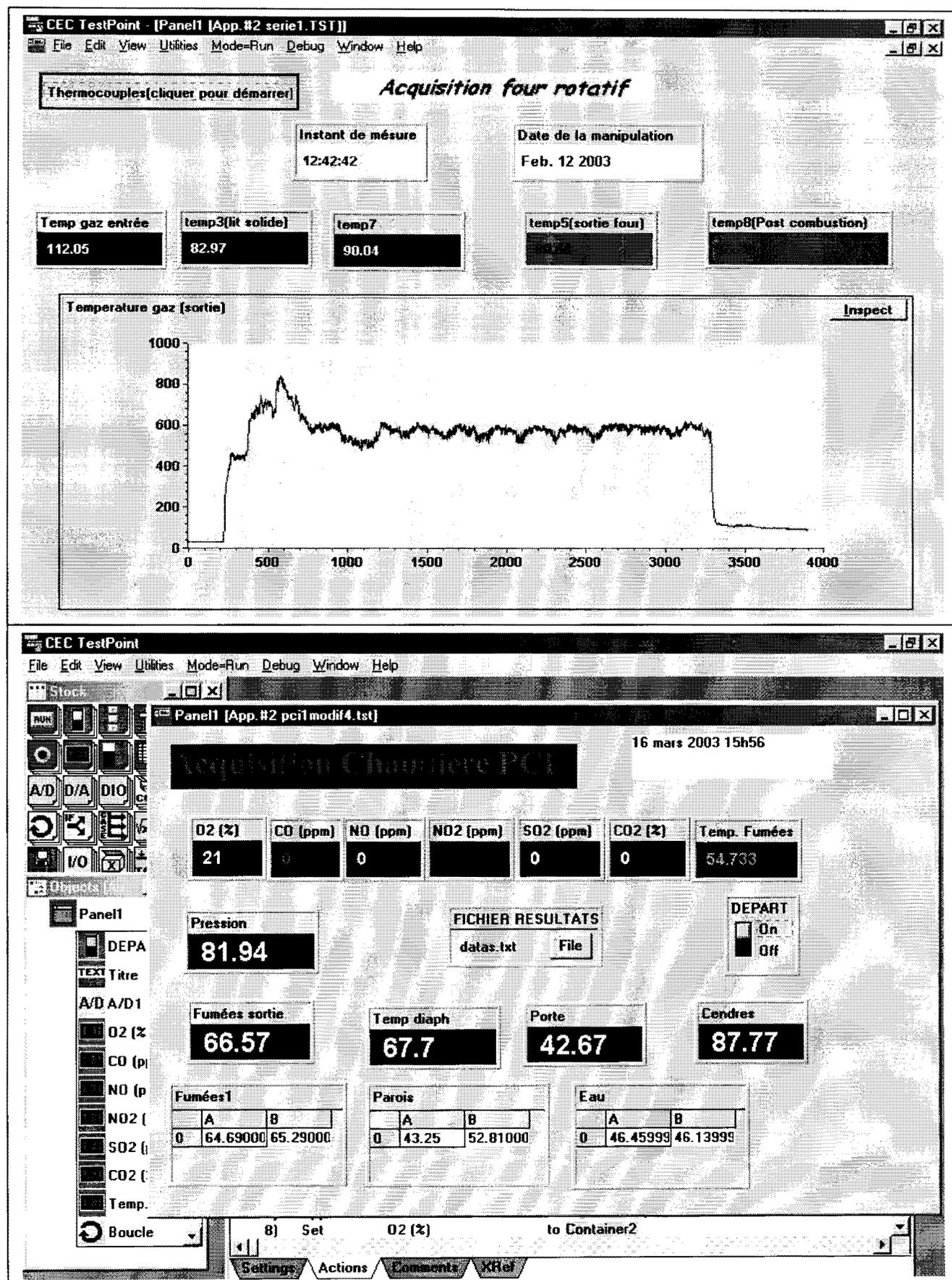


Figure 24 : Captures d'écran du logiciel Testpoint.

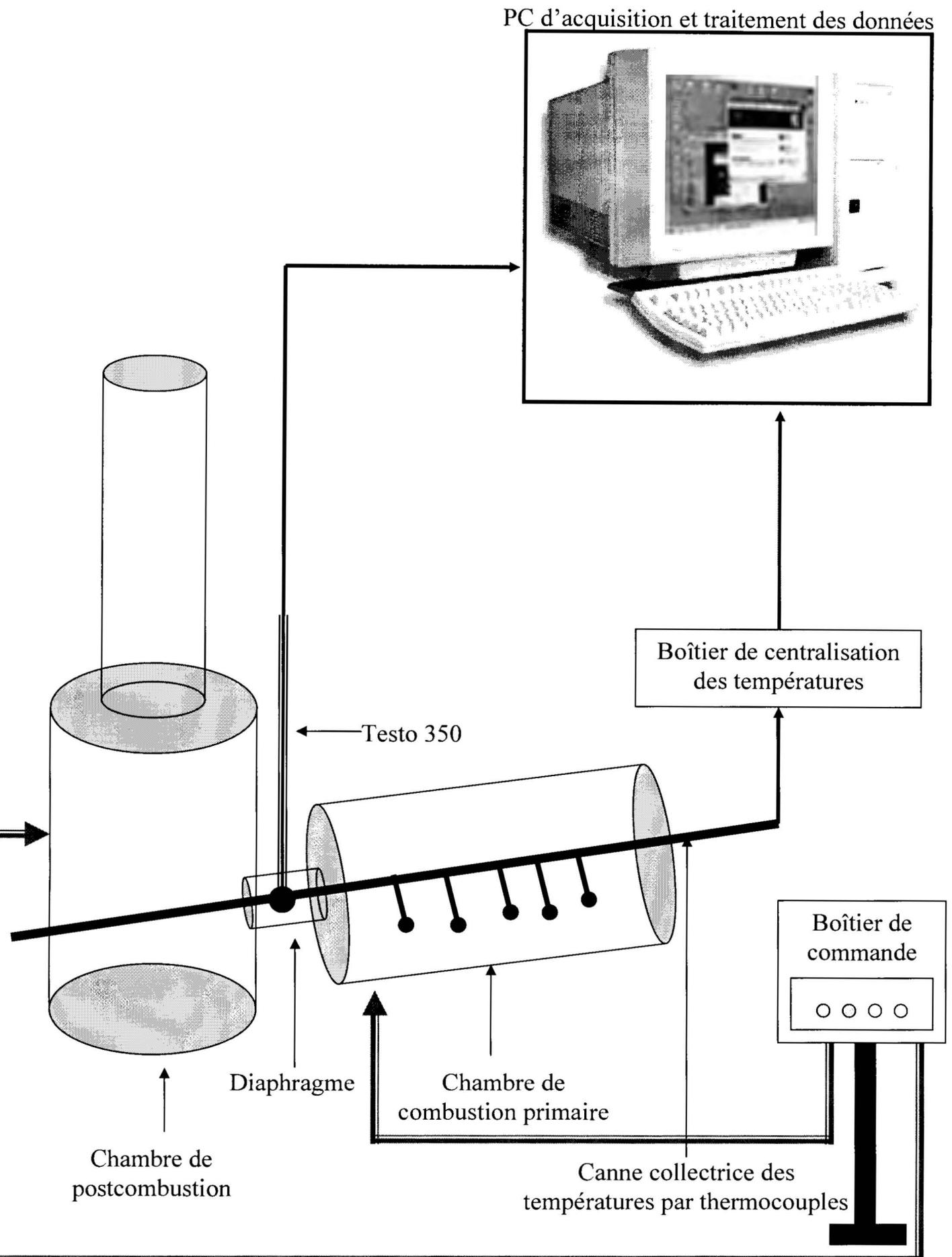


Figure 25 : Vue fonctionnelle d'ensemble du dispositif expérimental.

3.5. Le dispositif de mesure du PCI.

Le pouvoir calorifique inférieur est la quantité de chaleur minimale que dégage la combustion complète d'une unité de masse d'un combustible. Notre laboratoire est équipé d'un dispositif de mesure du PCI mis au point par le Laboratoire de Combustion et de Détonique (L.C.D.) de l'Université de Poitiers, France. Son élément principal est une chaudière construite par la société EQUADOR, dont nous reproduisons le schéma ci-dessous.

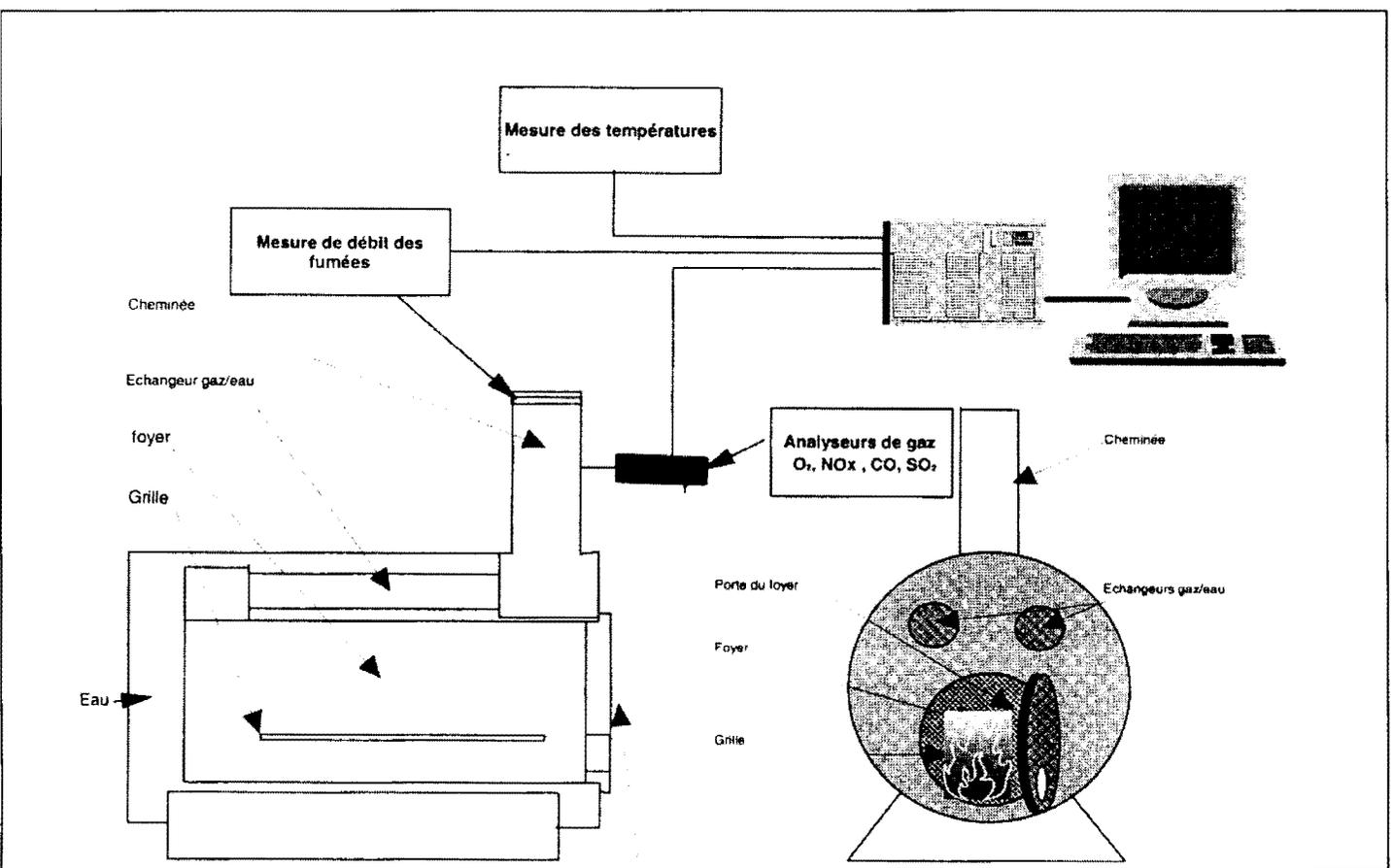


Figure 26 : Dispositif de mesure du Pouvoir Calorifique Inférieur.

Lorsqu'on brûle un déchet, l'énergie produite arrive sur un échangeur de chaleur situé au dessus du foyer du dispositif (figure 26). Dans le circuit échangeur de chaleur gaz/eau, circule en circuit fermé une quantité d'eau déterminée. La circulation de l'eau est assurée par une pompe intercalée dans le circuit de l'eau. Cette eau peut être renouvelée par vidange ; en ouvrant les « robinet 2, 3 et 4 » (figure 27) et remplissage; en ouvrant le « robinet 1 » approvisionné par le réseau public de distribution de l'eau et en fermant les « robinet 3 et 4 ». En

fonctionnement normal, les « robinets 1 et 3 » sont fermés et les « robinet 2 et 4 » sont ouverts.

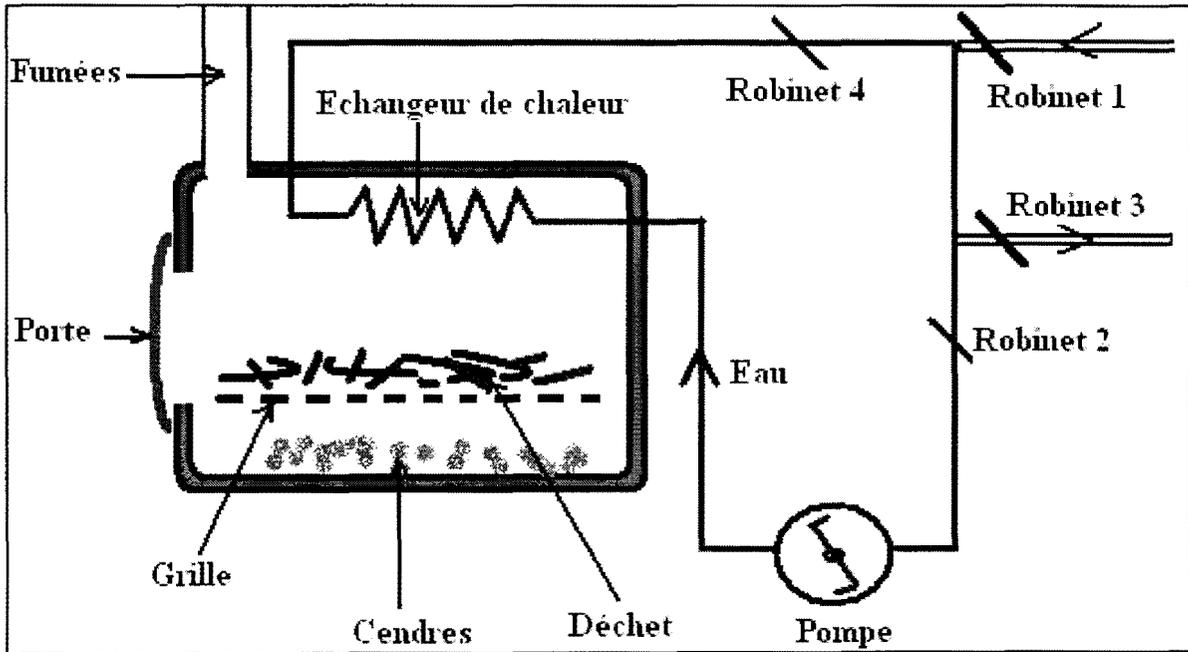


Figure 27: Circuit échangeur de chaleur du dispositif de mesure du PCI.

La combustion d'une masse m_d du déchet produit une énergie Q qui se répartie entre :

- L'eau circulant dans l'échangeur qui emmagasine l'énergie Q_1 .
- Les fumées qui emportent l'énergie Q_2 .
- La porte qui évacue une énergie Q_3 vers le milieu extérieur.
- Les cendres qui accumulent une énergie Q_4 .

Le bilan d'énergie du dispositif est donc : $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$.

D'après ZHOU [47], pour des températures de combustion dans le foyer de l'ordre de 700°C à 900°C , les fumées peuvent encore atteindre les températures supérieures à 200°C , on définit ainsi la quantité de chaleur Q_2 correspondant à la chaleur sensible des fumées :

$$Q_2 = \int_0^{t_{\max}} C_{pg}(t)V(t)T_F(t)dt$$

La construction de la chaudière est telle que Q_3 et Q_4 sont très négligeables devant Q_1 .

Connaissant la température de l'eau après la combustion du déchet, on détermine son PCI :

$$PCI \approx \frac{1}{m_d} (Q_1 + Q_2) = \left[\frac{m_e C_{pe} (T_{ef} - T_{ei})}{m_d} + \int_0^{t_{\max}} C_{pe}(t) V_F(t) T_F(t) dt \right]$$

m_e : masse de l'eau dans le circuit.

C_{pe} : pouvoir calorifique de l'eau à pression constante.

T_{ef} : température finale de l'eau.

T_{ei} : température initiale de l'eau.

t_{\max} : température maximale des fumées à la sortie.

$C_{pg}(t)$: pouvoir calorifique des gaz à pression constante.

$V_F(t)$: débit volumique des fumées.

$T_F(t)$: température des fumées.

Chapitre 4 : Etude expérimentale et résultats obtenus.

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier l'influence des principaux paramètres de fonctionnement du four rotatif sur la performance thermique ainsi que l'émission du CO, CO₂ et des NOx. Seront étudiés, les effets de la vitesse de rotation, le taux de remplissage ou la charge et l'excès d'air.

4.2. Etude de l'influence de la vitesse de rotation

4.2.1. Calibrage des vitesses de rotation.

Nous avons d'abord procédé au calibrage des vitesses de rotation de la chambre de combustion. Cette vitesse est réglable par une manivelle. La rotation de la manivelle dans le sens trigonométrique augmente la vitesse de rotation. En comptant 10 rotations et en mesurant le temps correspondant, nous avons obtenu les vitesses suivantes :

Maximum (à gauche)	0	2	4	6	8	10
Vitesse (tours / min)	1.2	0.98	0.76	0.54	0.32	0.10
Rotation 	0	2 tours	4 tours	6 tours	8 tours	10 tours

Tableau 18 : Calibrage des vitesses de rotation du four.

4.2.2. Résultats des mesures.

La figure 28 suivante montre l'effet de la rotation de la chambre de combustion, chargée avec le déchet modèle, sur la température moyenne. Cette température présente un minimum dans les valeurs intermédiaires de la vitesse de rotation et une plus grande valeur aux basses ou hautes vitesses de rotation.

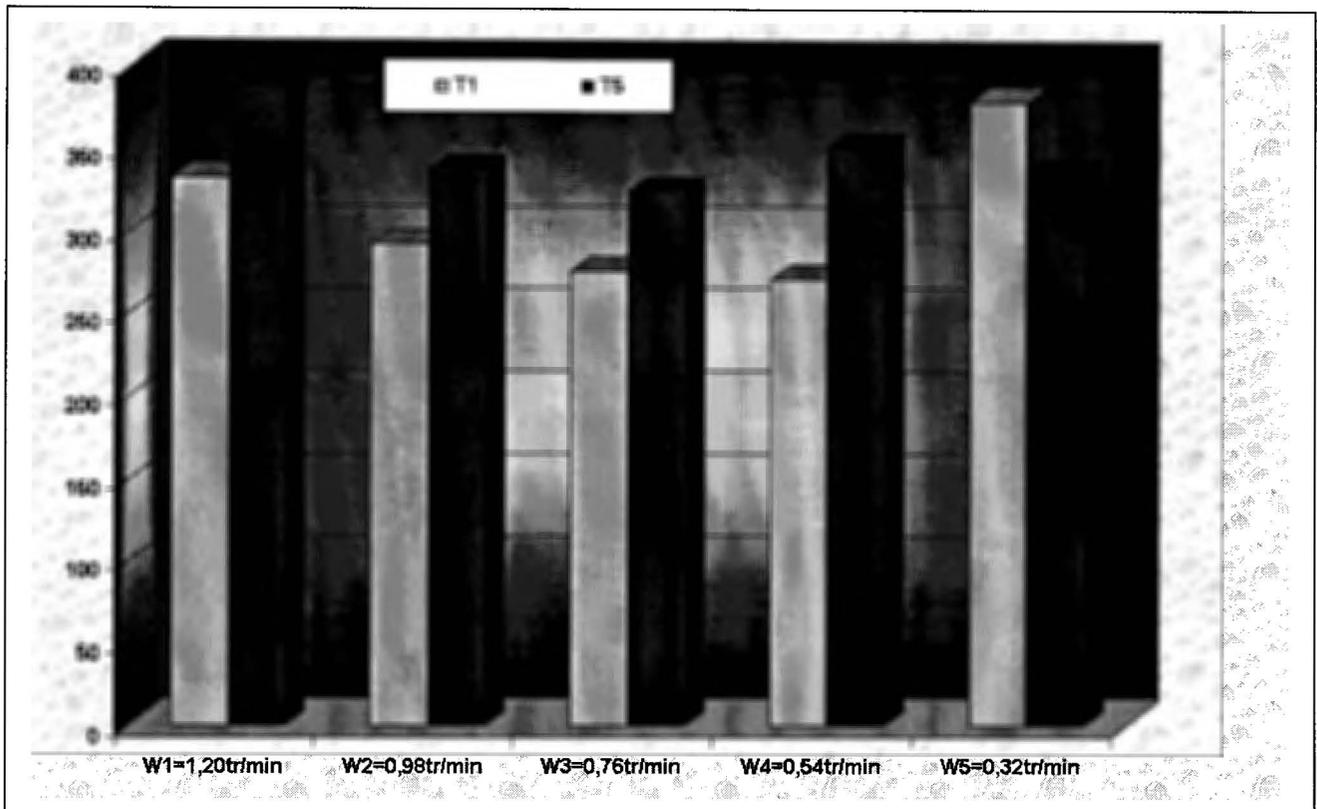


Figure 28 : Effet de la vitesse de rotation sur les températures T_1 et T_5 .

Lorsque la chambre de combustion est vide, la vitesse de rotation n'a pas d'effet les températures en un point donné, mais les températures varient d'un point à l'autre de l'axe du cylindre. On constate que la température va décroissante sur l'axe du cylindre en fonction de la position à partir de l'origine (brûleur primaire). Nous avons à la figure 28, l'évolution à vide des température T_1 (entrée de la chambre de combustion), T_5 (sortie de la chambre de combustion) et T_{sonde} (sommet du cylindre de base de la postcombustion). Au niveau de la sonde, la température moyenne n'est plus que de 125 °C environ, ce qui confirme le rôle refroidisseur de la chambre de postcombustion : à la sortie de la cheminée, on doit avoir une température basse avant le rejet des gaz dans l'atmosphère.

A vide les températures présentent trois parties :

- une partie exponentielle croissante à l'allumage des brûleurs. L'apport de chaleur de la combustion chauffe le gaz dans le four ainsi que les matériaux réfractaires jusqu'à atteindre une température d'équilibre.
- Une partie « linéaire » où la température reste stable autour de sa valeur moyenne à 20 °C près.

- Une troisième partie exponentielle décroissante qu'on observe à l'arrêt des brûleurs.

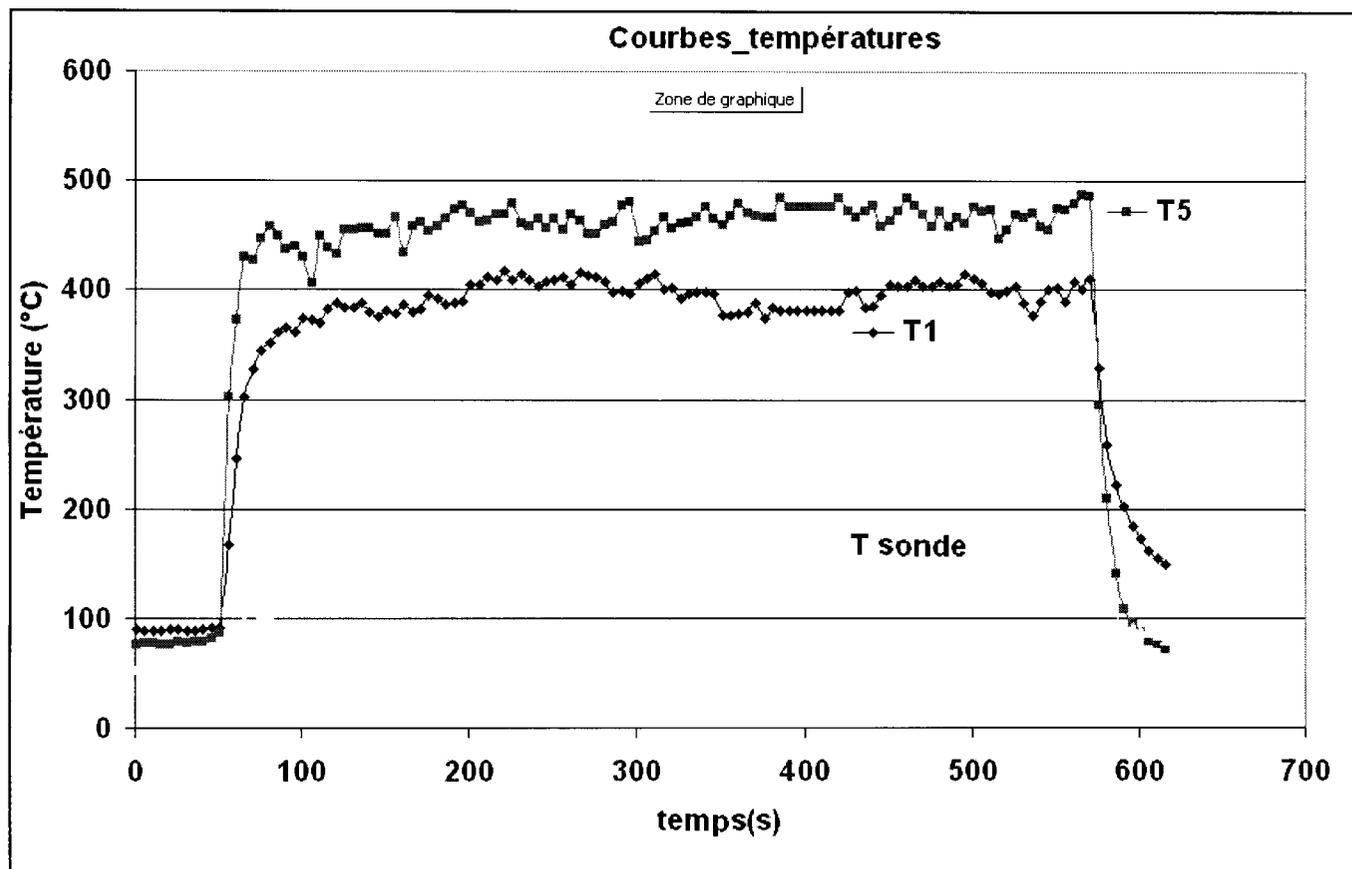


Figure 29 : Evolution des températures dans le four à vide.

En régime stationnaire, on observe :

- à l'entrée de la chambre de combustion, $T_1 = (400 \pm 20)^\circ\text{C}$,
- à la sortie de la chambre de combustion, $T_5 = (475 \pm 20)^\circ\text{C}$,
- à la sortie de la chambre de postcombustion, $T_{\text{sonde}} = (130 \pm 20)^\circ\text{C}$

La figure 29, nous donne l'évolution des concentrations de monoxyde de carbone à la sortie de la chambre de postcombustion (sonde), lors de la combustion d'une masse de 500g du déchet modèle avec un seul brûleur (primaire).

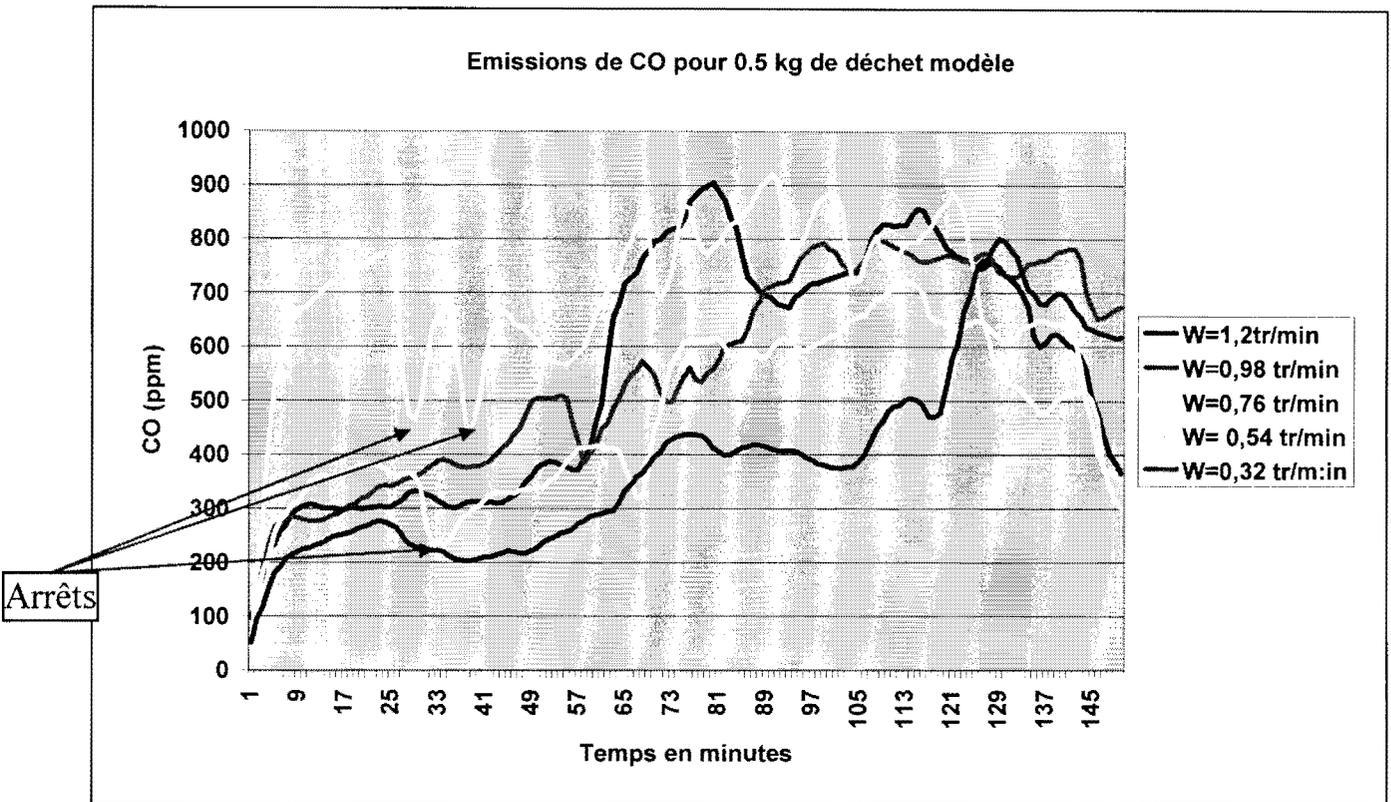


Figure 30 : Evolution des concentrations de CO à différentes vitesse de rotation, en fonction du temps.

Sur la figure 30 ci-dessus, « arrêts » indiquent l'arrêt du moteur du brûleur primaire (problème technique). Il y en a eu deux à la vitesse de 0,54 tr/min et un à celle de 0,76tr/min.

L'observation de la courbe 31 ci-dessous monte que les émissions cumulées de CO varient dans le même sens que la vitesse de rotation, exception faite de la vitesse de 0,76 tr/min. En effet, le moteur du brûleur s'était arrêté deux fois au début de la manipulation à cette vitesse. Or l'arrêt du moteur engendre une plus grande production de CO (combustion incomplète) ce qui a artificiellement augmenté les émissions cumulées de CO.

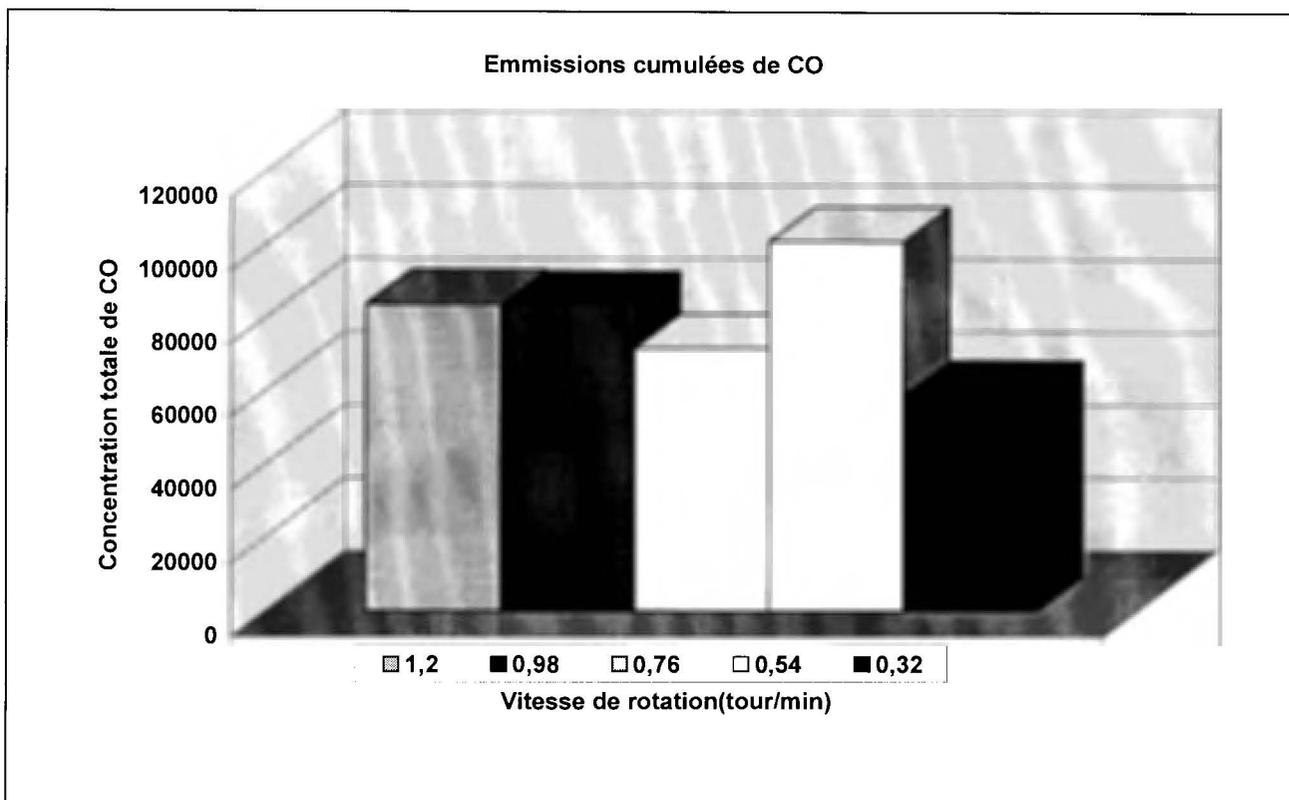


Figure 31 : Variation des émissions cumulées de CO en fonction de la vitesse de rotation.

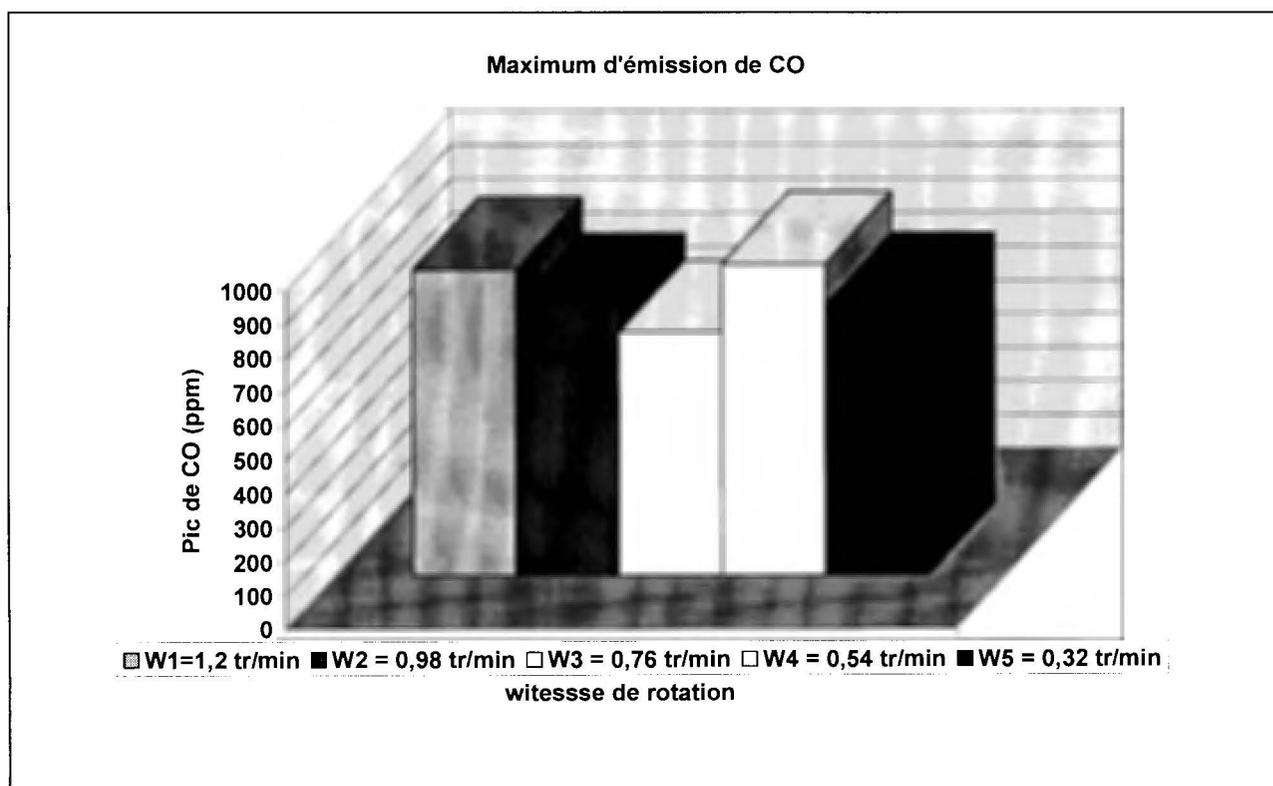


Figure 32 : Emissions maximum de CO en fonction de la vitesse de rotation.

La figure 32 montre que les concentrations maximales de CO sont minimales à $\omega = 0,76$ tour par minute, bien qu'il y ait aussi eu un arrêt du brûleur cette vitesse.

4.3. Etude de l'effet de la charge

La température dans le réacteur dépend de la quantité de matière combustible introduite. L'étude de l'effet de la charge devrait donc nous permettre de mettre en évidence cette corrélation.

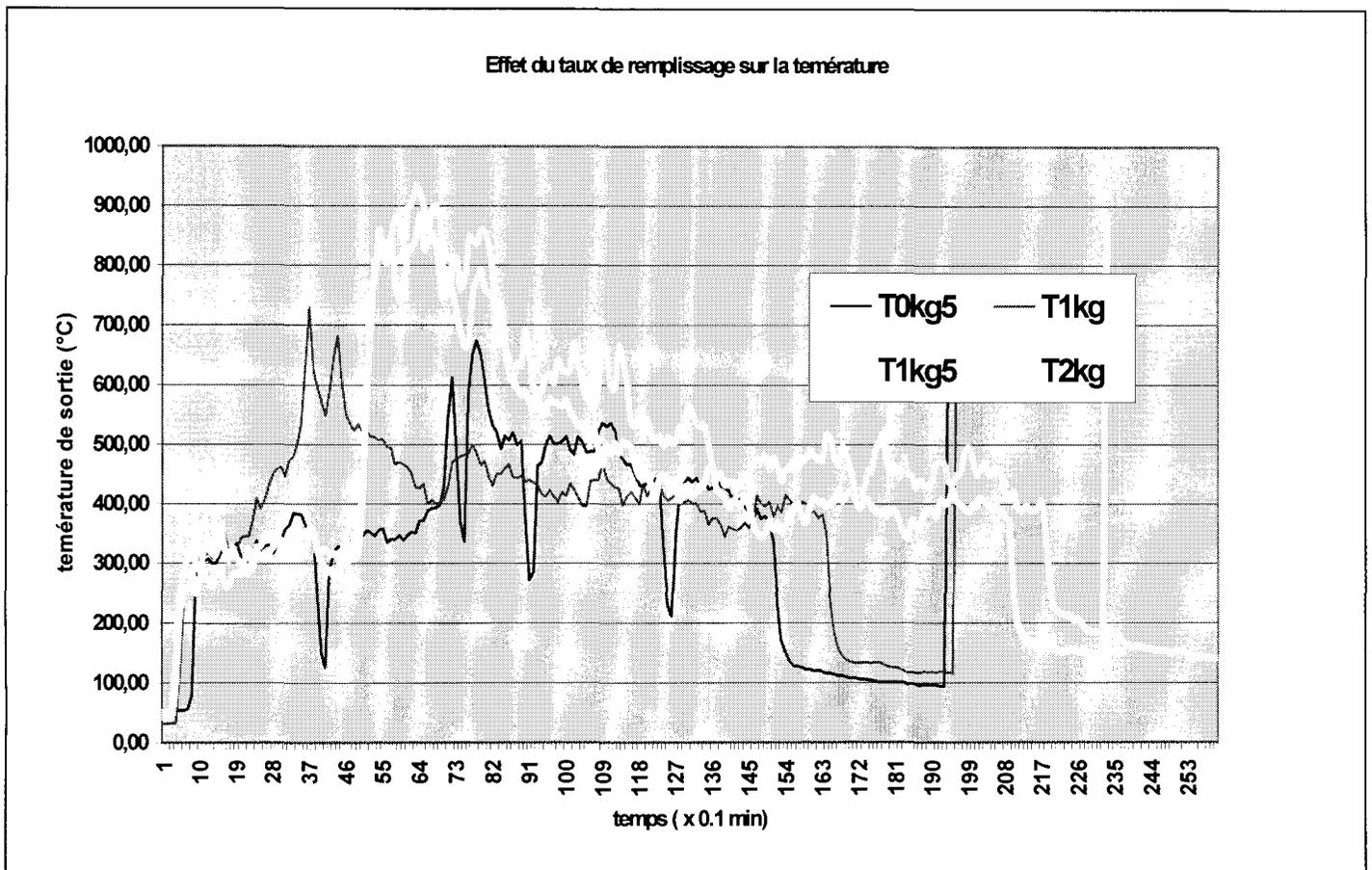


Figure 33 : Evolution des températures en fonction du temps à différentes charges.

Lors de la combustion de 500 g du déchet modèle, le brûleur primaire s'était arrêté vers la quatrième minute de l'expérience (arrêt puis redémarrage spontané du brûleur). Les courbes des températures à différentes charges montrent une partie transitoire dans les trois premières minutes et une autre exponentielle décroissante jusqu'à 20 ou 25 minutes. En se limitant aux parties exponentielles et aux charges de 1 à 2 kg, nous obtenons les courbes de la figure 34 ci-dessous.

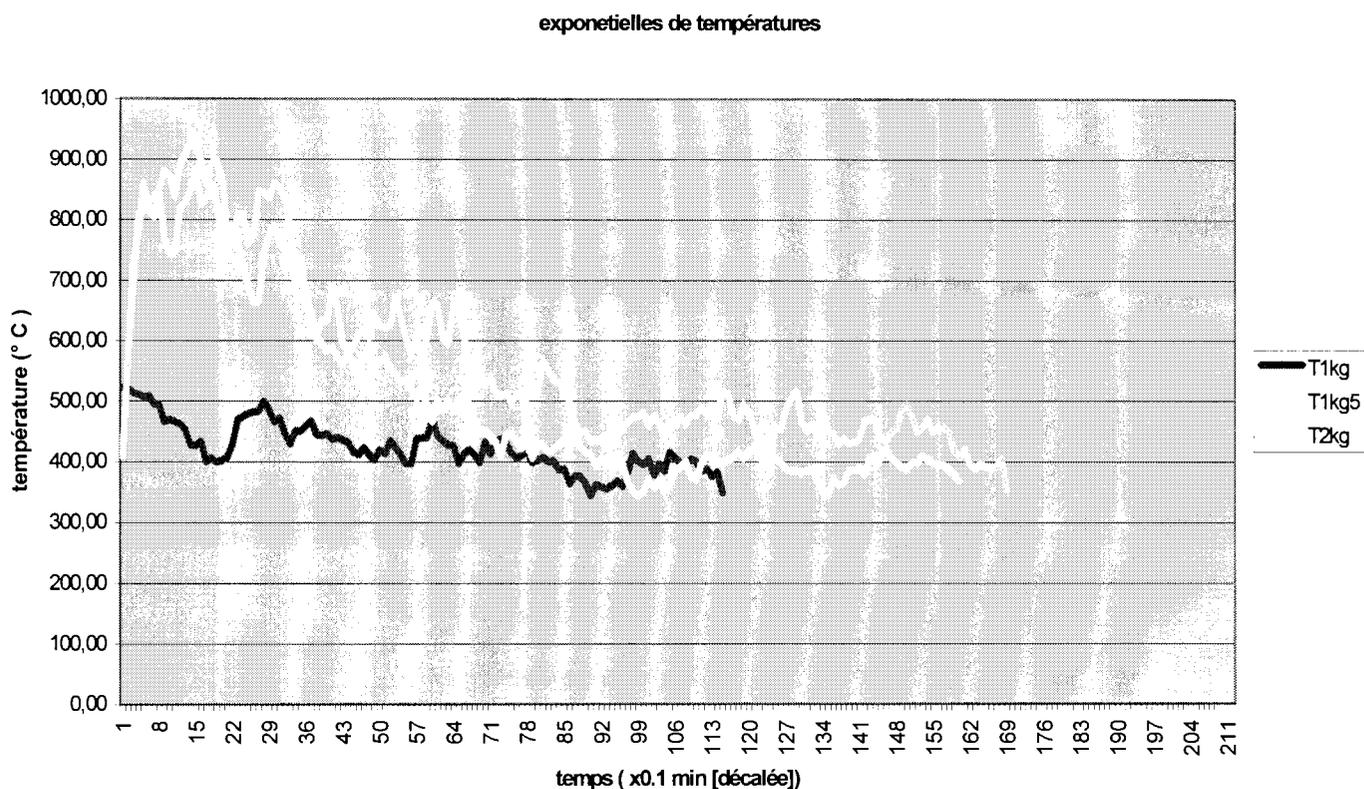


Figure 34 : Evolution des températures en fonction du temps pour 1 à 2 kg de charge, limitées aux parties exponentielles.

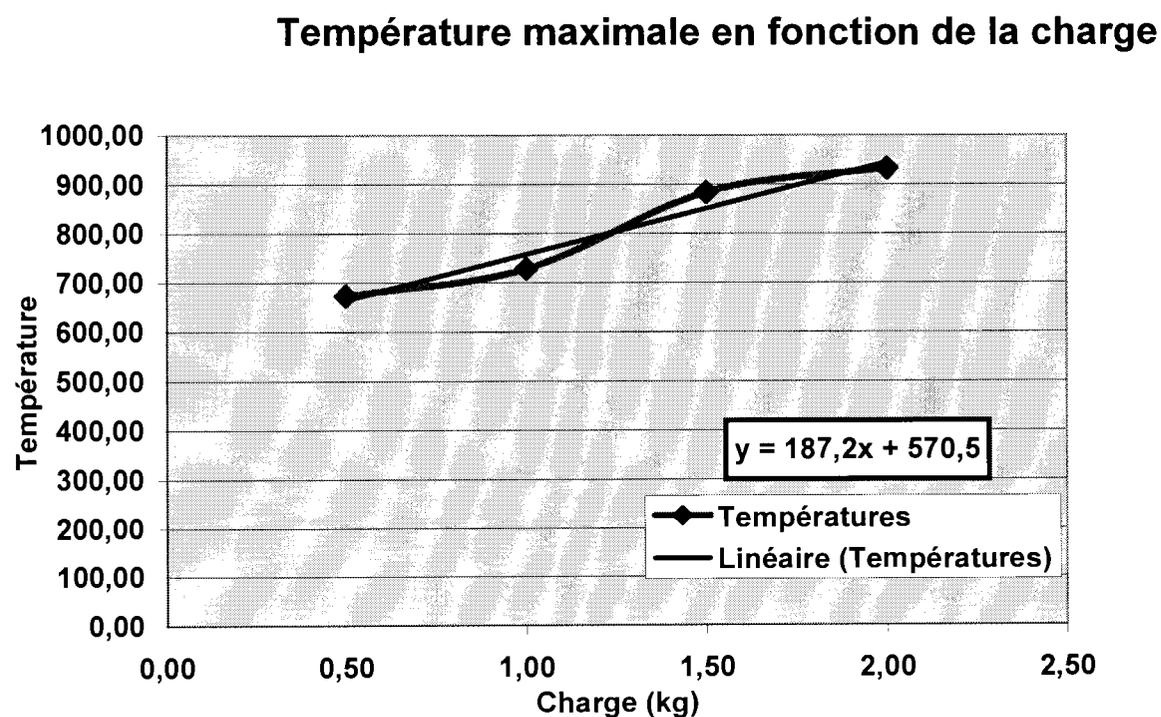


Figure 35 : Relation charge - température maximale atteinte par le déchet modèle.

La figure 35 nous donne l'évolution de la température maximale des gaz à différentes charges. T_{gm} étant la température maximale des gaz à la sortie de la chambre de combustion, m_d la masse du déchet modèle, nous déduisons la corrélation suivante :

$$T_{gm} = 187,2 m_d + 570,5 \quad (4.3.1)$$

Cela veut dire que la température maximale des gaz à la sortie de la chambre de combustion sera de $570,5^\circ\text{C}$. La courbe d'évolution de la température T_5 (figure 29) confirme cela. On voit que pour dépasser une température maximale de 1000°C , il faut introduire au moins $2,3$ kg de combustible (déchet modèle).

L'évolution de la température moyenne des gaz à la sortie de la chambre de combustion à différentes charges est donnée sur la figure 36 :

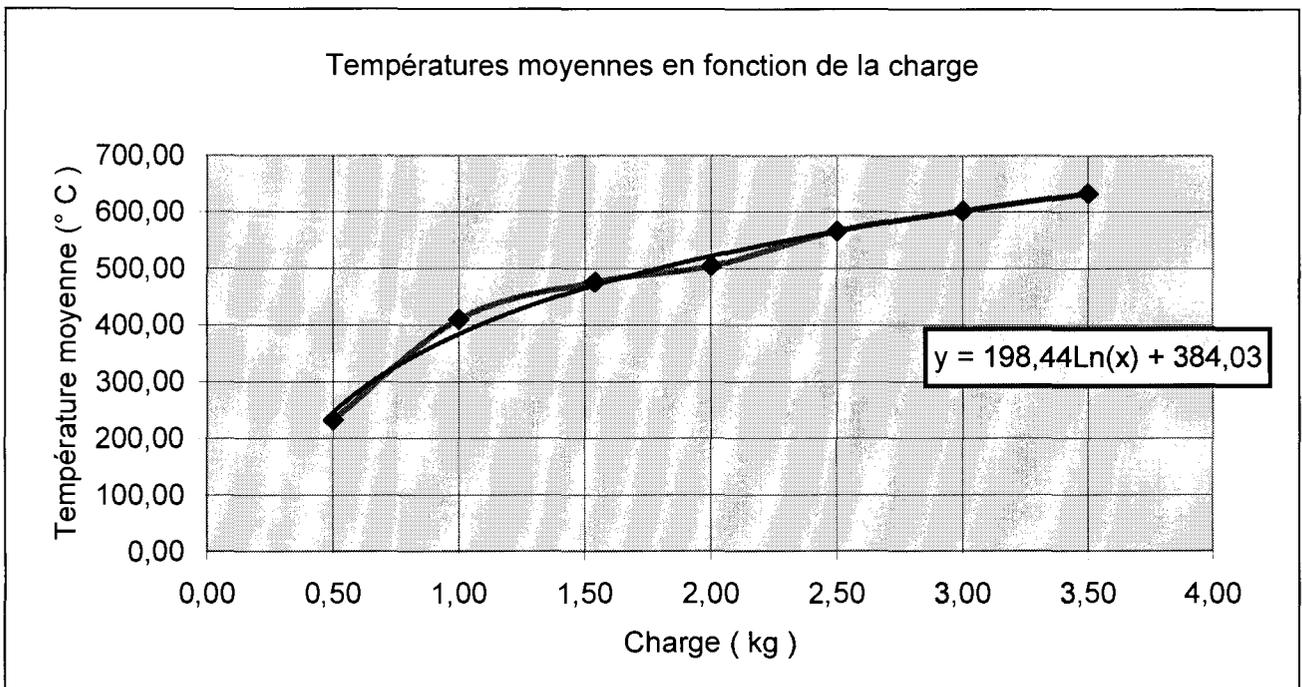


Figure 36 : Relation charge - température moyenne, lors de la combustion du déchet modèle.

De l'observation de la figure 36 on déduit la corrélation :

$$T_{gmoy} = 198,44 \ln(m_d) + 384,03 \quad (4.3.2)$$

T_{gmoy} : température moyenne des gaz à la sortie de la chambre de combustion,

m_d : la masse du déchet modèle introduit dans le four.

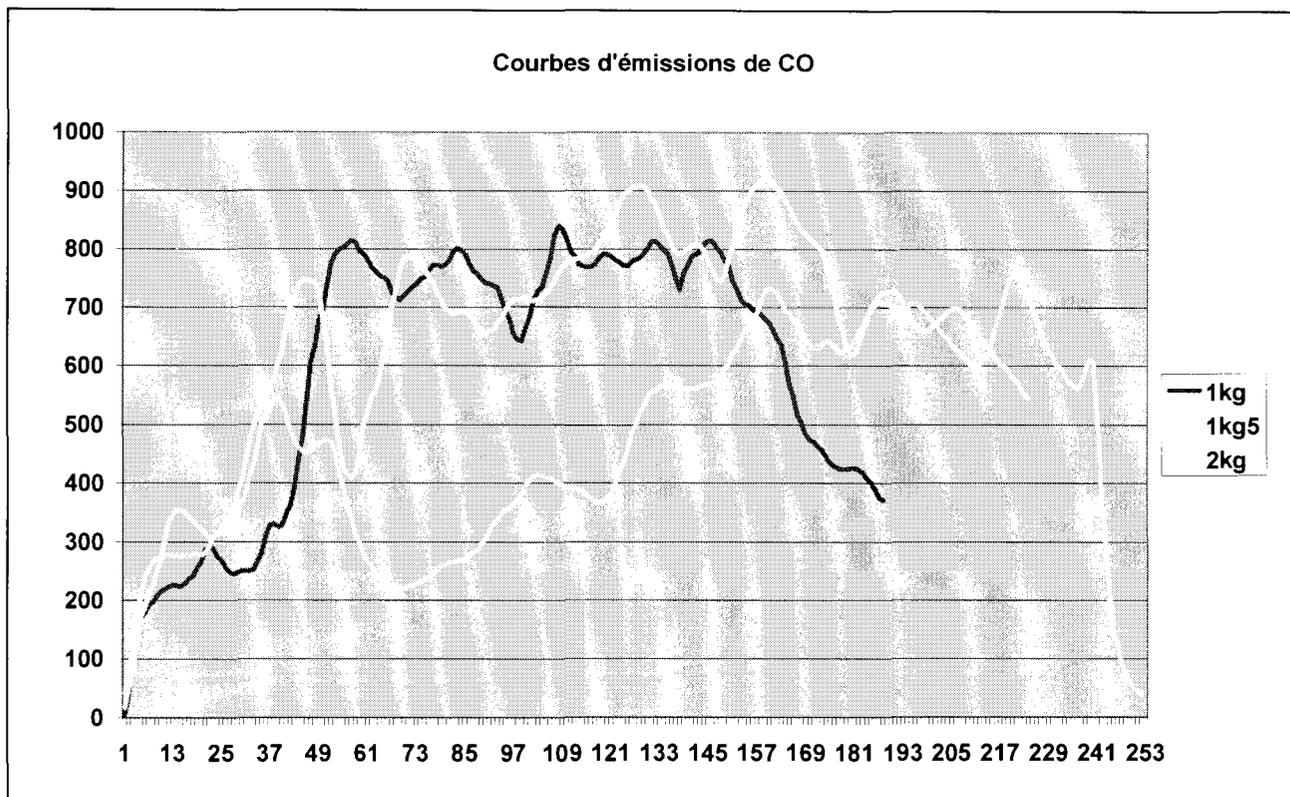


Figure 37: Evolution de la concentration de CO émise par le déchet modèle, en fonction de la charge.

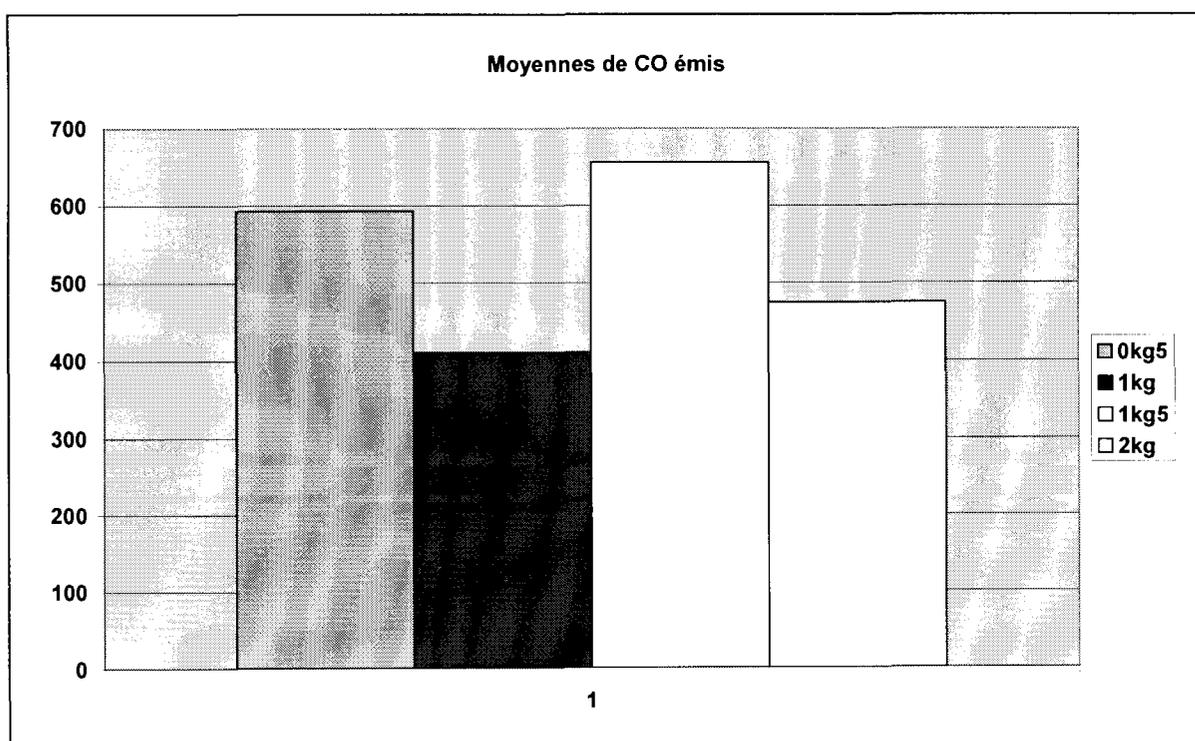


Figure 38 : Moyennes de CO émis par le déchet modèle en fonction de la charge.

L'observation de la figure 37 et de la suivante (figure 38) qui donne les émissions moyennes de CO en fonction de la charge, suggère que les émissions de CO ne sont pas clairement liées à la charge. Nous pensons que la charge n'est pas un paramètre dans l'émission de CO, mais qu'elle dépend plutôt des autres paramètres (vitesse de rotation et excès d'air).

Les courbes d'émissions du monoxyde d'azote (NO) sont données en figure 39 et 40. On constate que les émissions de NO augmentent avec la charge.

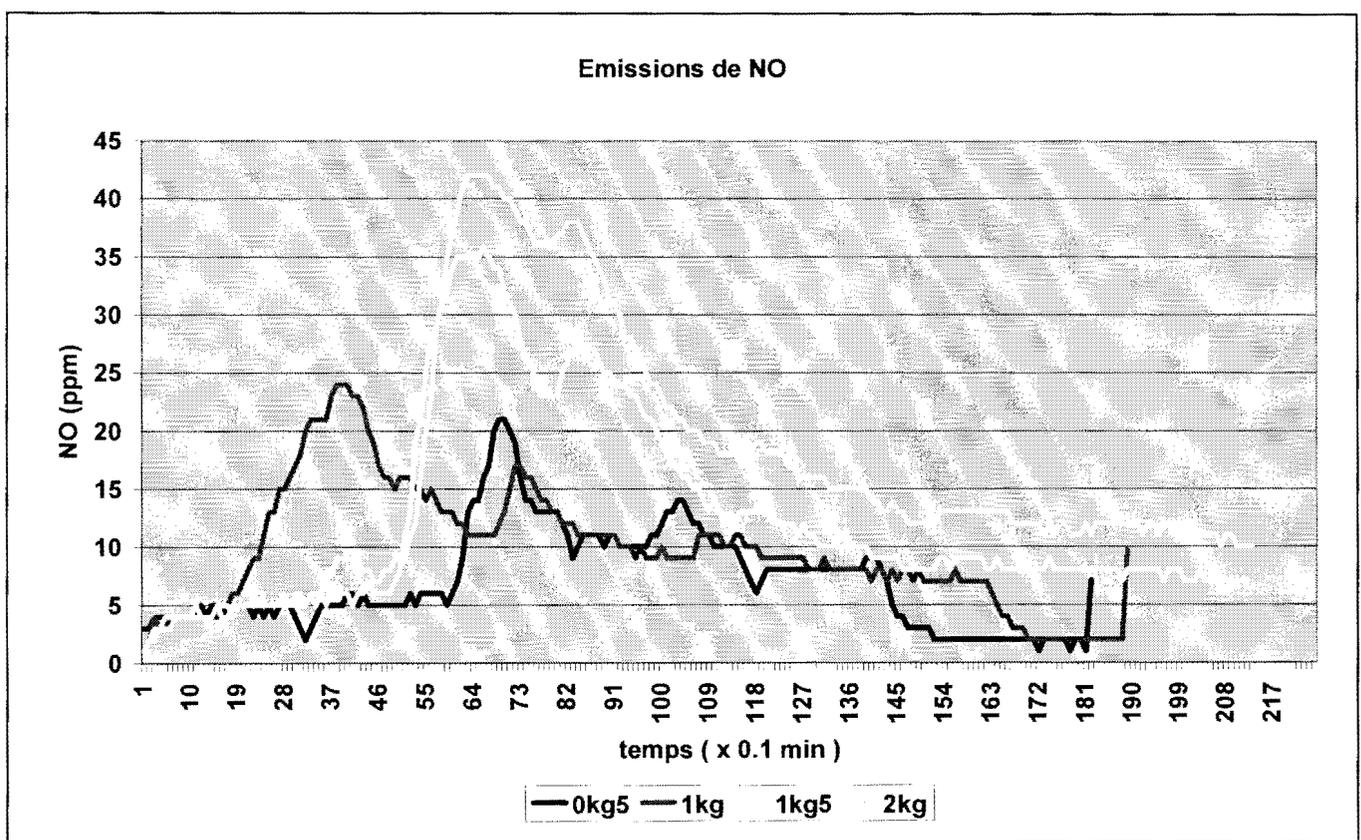


Figure 39 : Evolution des émissions de NO du déchet modèle en fonction de la charge.

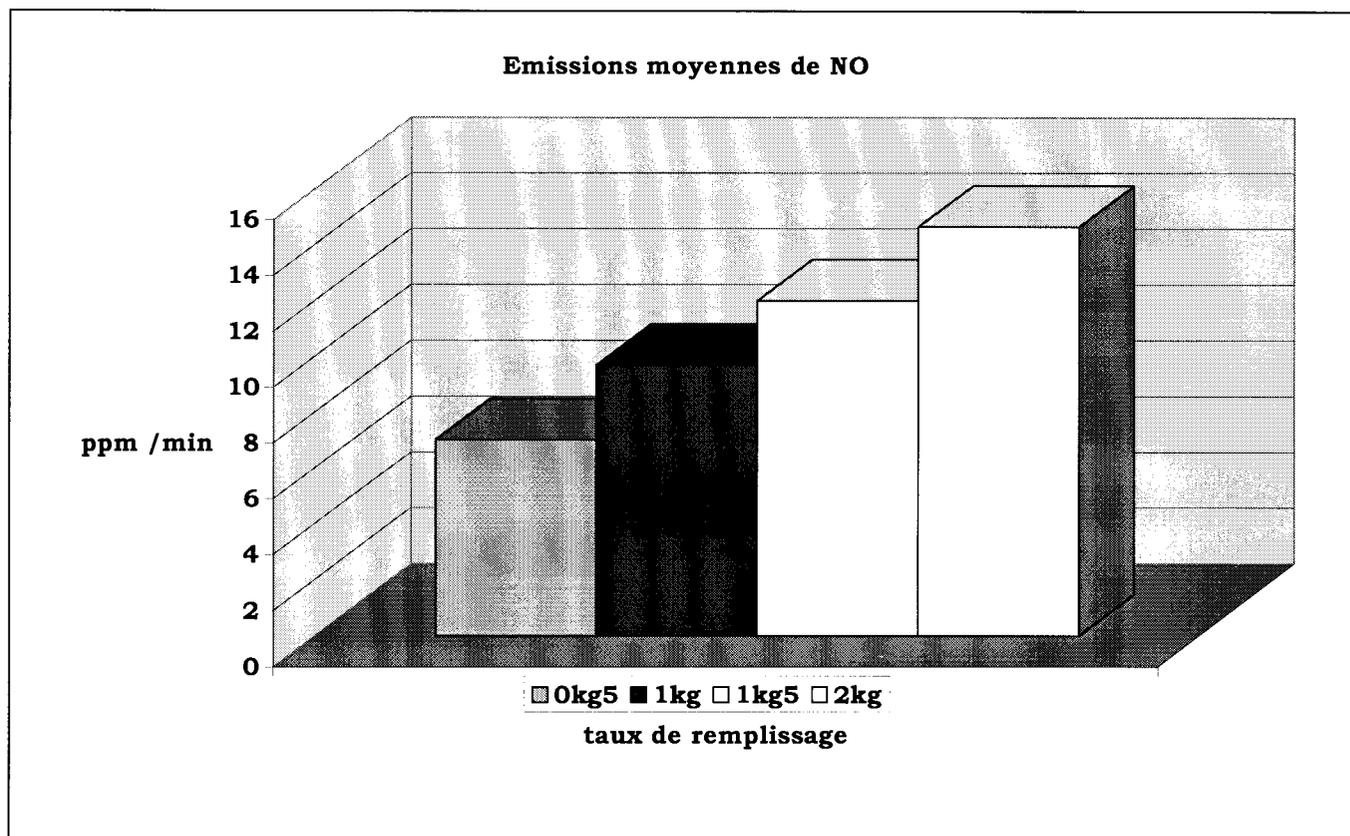


Figure 40 : Emissions moyennes de NO du déchet modèle par unité de temps en fonction de la charge.

La quantité de NO émis par unité de temps est une fonction linéaire croissante de la charge (figure 40). Cette remarquable linéarité conduit à la corrélation :

$$[\text{NO}] \text{ (ppm/min)} = 2,513 m_d + 4,565 \quad (4.3.3)$$

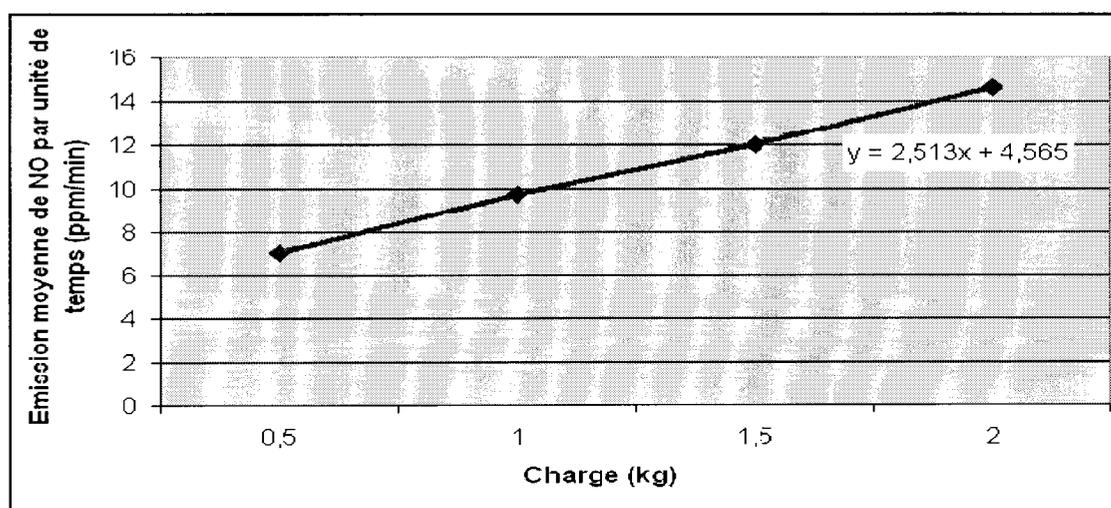


Figure 41: Emissions moyennes du NO par unité de temps par le déchet modèle en fonction de la charge.

Les émissions de CO₂ par le déchet modèle à différentes charges, en fonction du temps, à la vitesse de 0,76 tour/min sont données sur la figure 42 :

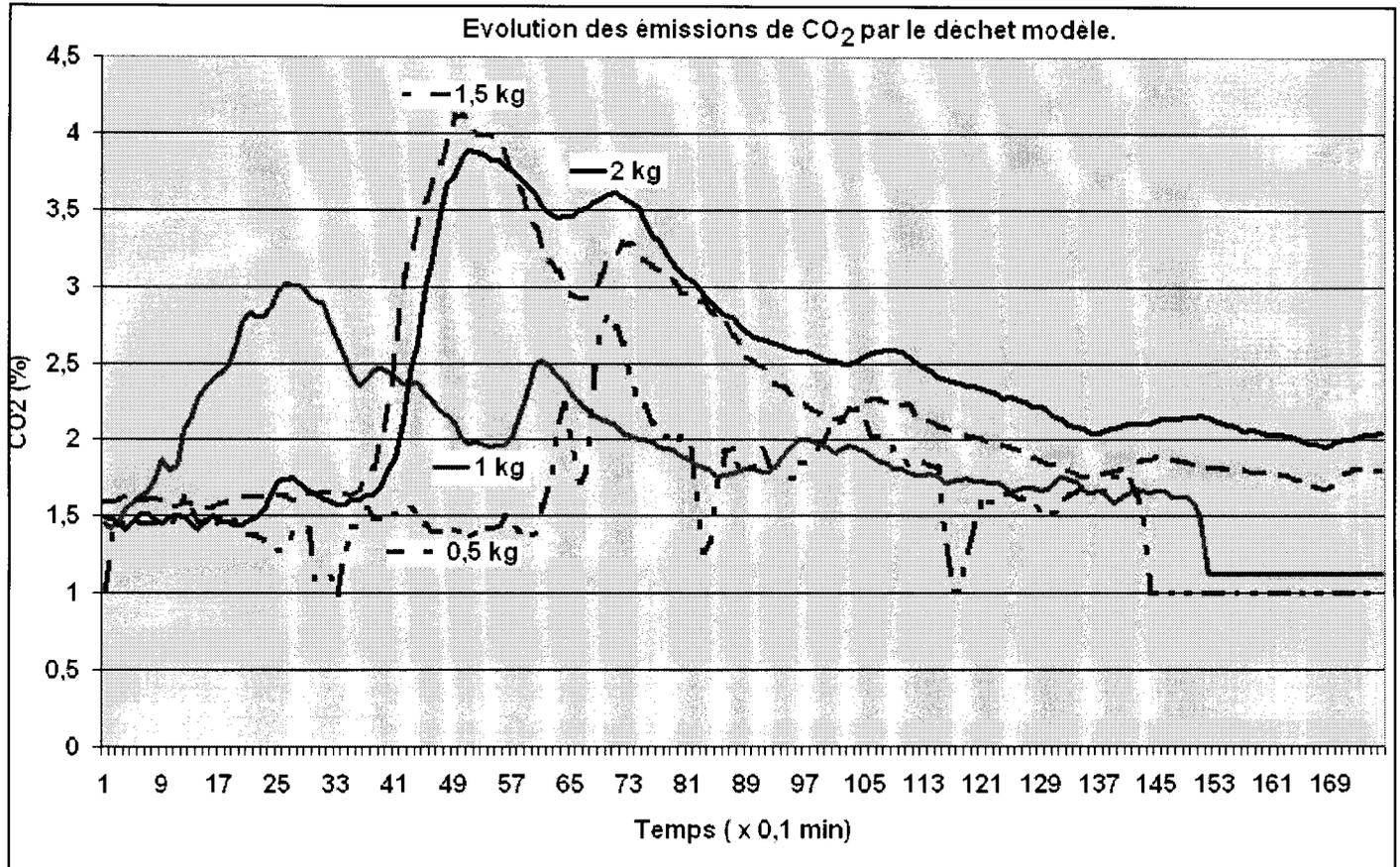


Figure 42 : Evolution de la concentration de CO₂ émis lors de la combustion du déchet modèle en fonction du temps, pour différentes charges.

La concentration moyenne de CO₂ en fonction de la masse est donnée sur la figure 42. On en déduit la corrélation :

$$[CO_2]/min (\%) = 0,29 m_d + 1,28 \quad (4.3.4)$$

Cette relation veut dire que la concentration de CO₂ pendant minute est une fonction linéaire croissante de la masse.

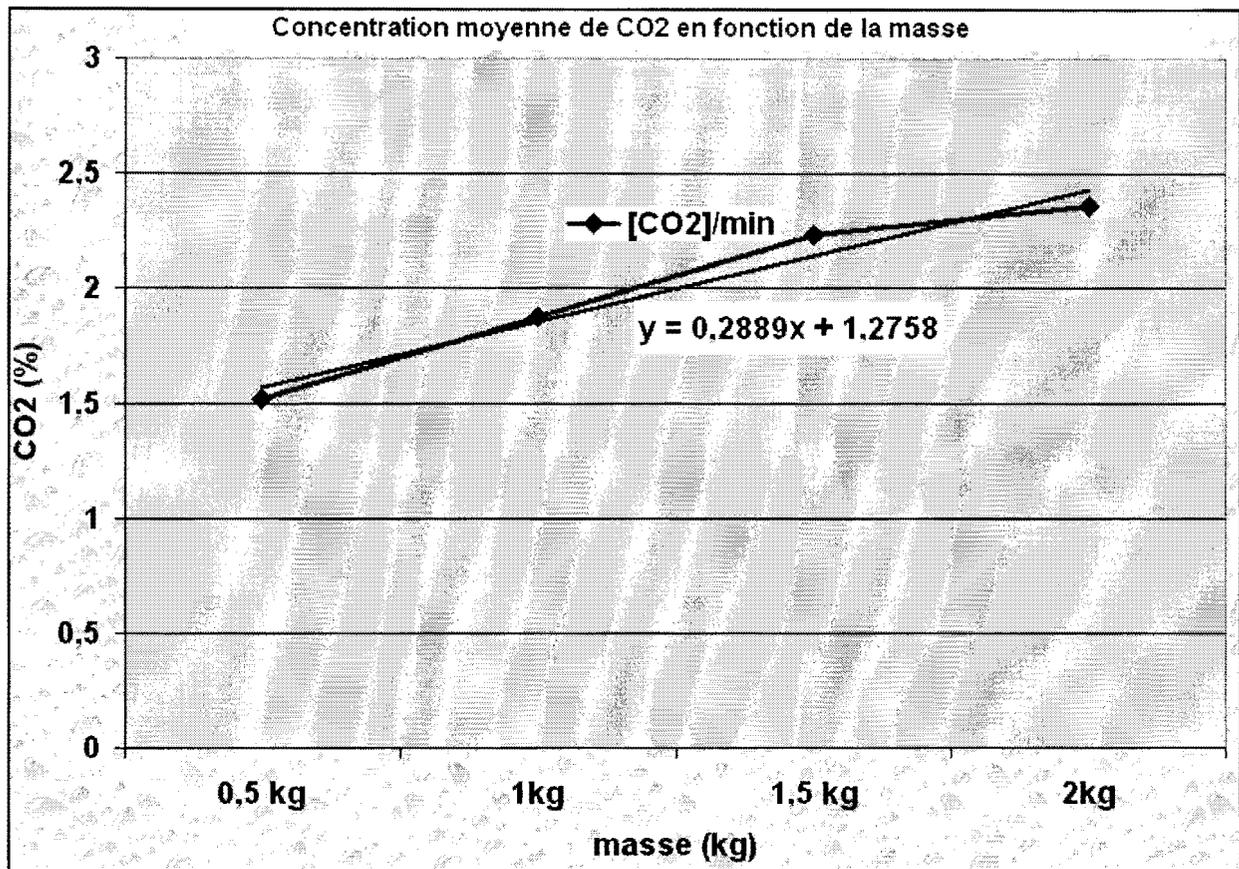


Figure 43 : Pourcentage moyen de CO₂ émis par le déchet modèle en fonction de la masse.

Les émissions de SO₂ en fonction de la charge sont représentées sur la figure 44. Elles ne suggèrent aucune corrélation. On remarque seulement que la concentration de SO₂ est inférieure à 35ppm. Mais si nous écartons la masse de 0,5kg [*], nous obtenons les courbes de la figure 45.

* Puisqu'une bonne combustion exige une température suffisante, comme la température croît avec la charge, nous pouvons écarter la masse de 0,5kg.

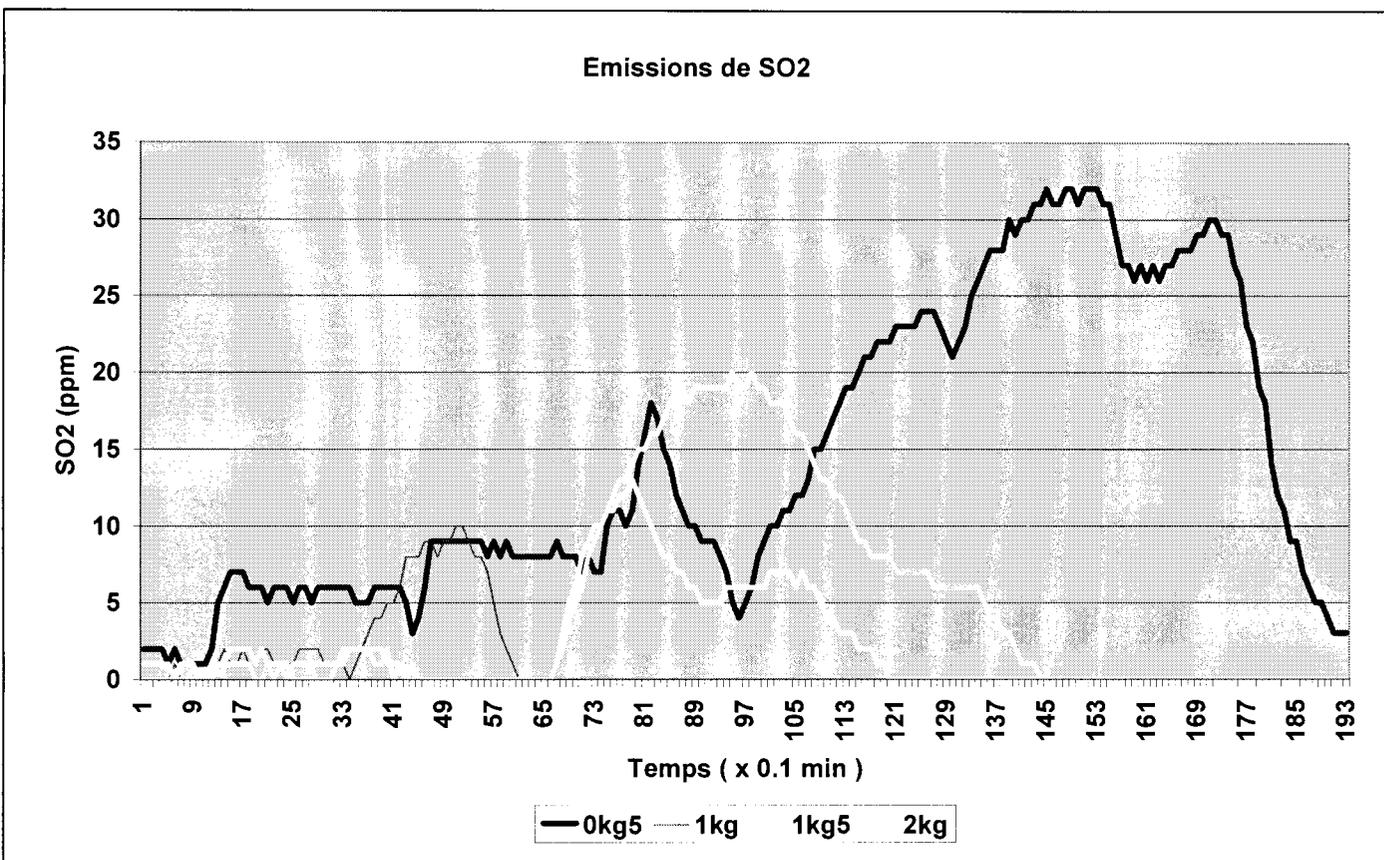


Figure 44 : Emissions de SO₂ par le déchet modèle en fonction de la charge.

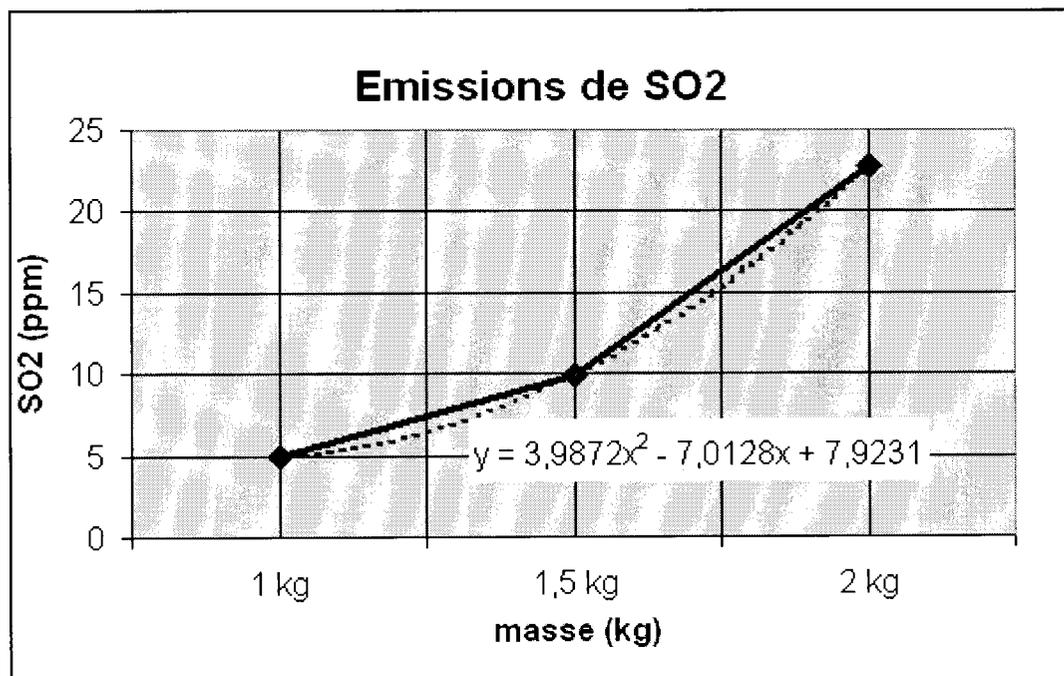


Figure 45 : Emissions de SO₂ par le déchet modèle entre 1 et 2 kg.

Les émissions de SO_2 ne dépassent pas 30 ppm dans toutes nos expériences. Entre pour des masses supérieures ou égales à 1 kg, les émissions de SO_2 sont reliées à la masse (m_d) du déchet par :

$$[\text{SO}_2] \text{ (ppm)} = 3,99 m_d^2 - 7,01 m_d + 7,92 \quad (4.3.5)$$

Expression de la masse en fonction du taux de remplissage du four.

Nous pouvons établir une relation entre le taux de remplissage et la masse du déchet, car on peut, en supposant constante la masse volumique du déchet, remplacer la masse par le taux de remplissage.

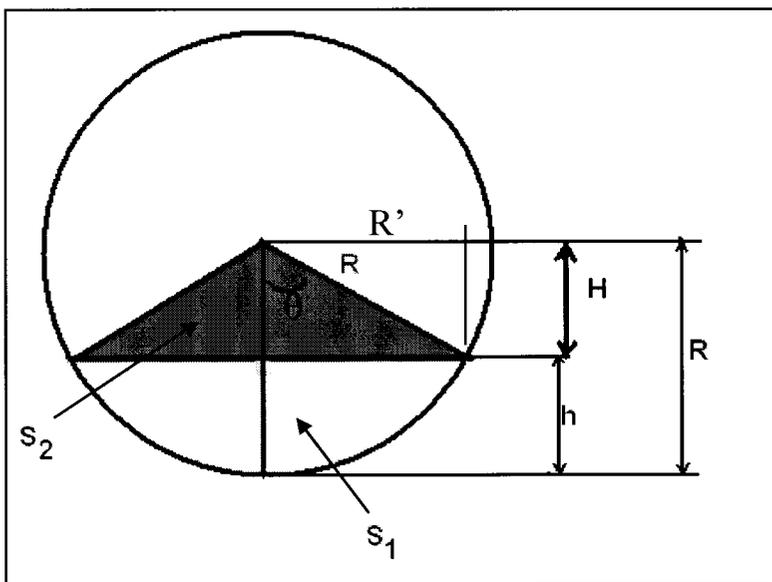


Figure 46.: Coupe transversale de la chambre de combustion.

Soit h la hauteur du lit solide. R le rayon du four. Le taux de remplissage est défini comme $\tau = h/R$. Le calcul du volume du lit solide effectué en supposant la chambre de combustion horizontale donne :

$$V = s.L \text{ et } s = S_1 - S_2$$

$$\text{Avec } S_1 = \int_0^R \int_0^\theta r \cdot dr \cdot d\theta = \left[\frac{R^2}{2} \right]_0^R [\theta]_0^{\theta_0} = \frac{R^2}{2} \theta$$

$$\text{et } S_2 = \frac{1}{2} R' \cdot H, \text{ où } H = R - h ;$$

soit $s = \frac{R^2}{2} [\theta - \frac{R'}{R} (1 - \frac{h}{R})]$, avec

ρ : masse volumique du déchet [kg.m⁻³]

L : longueur de la chambre de combustion [m]

θ : angle formé par R et la verticale [rad]

d'où la masse $m = \rho.v$:

$$m = \rho \frac{R^2}{2} [\theta - \frac{R'}{R} (1 - \frac{h}{R})] \tag{4.3.6}$$

or $\cos \theta = \frac{H}{R} = 1 - \tau$, donc $\theta = \text{Arc cos}(1 - \tau)$

En remplaçant les valeurs de θ et h/R dans l'équation (4.3.6) on obtient:

$$m = \rho.L. \frac{R^2}{2} [\text{Arc cos}(1 - \tau) - \sqrt{\tau(2 + \tau)}] \tag{4.3.7}$$

La relation $m=f(\tau)$ est tracée ci-dessous.

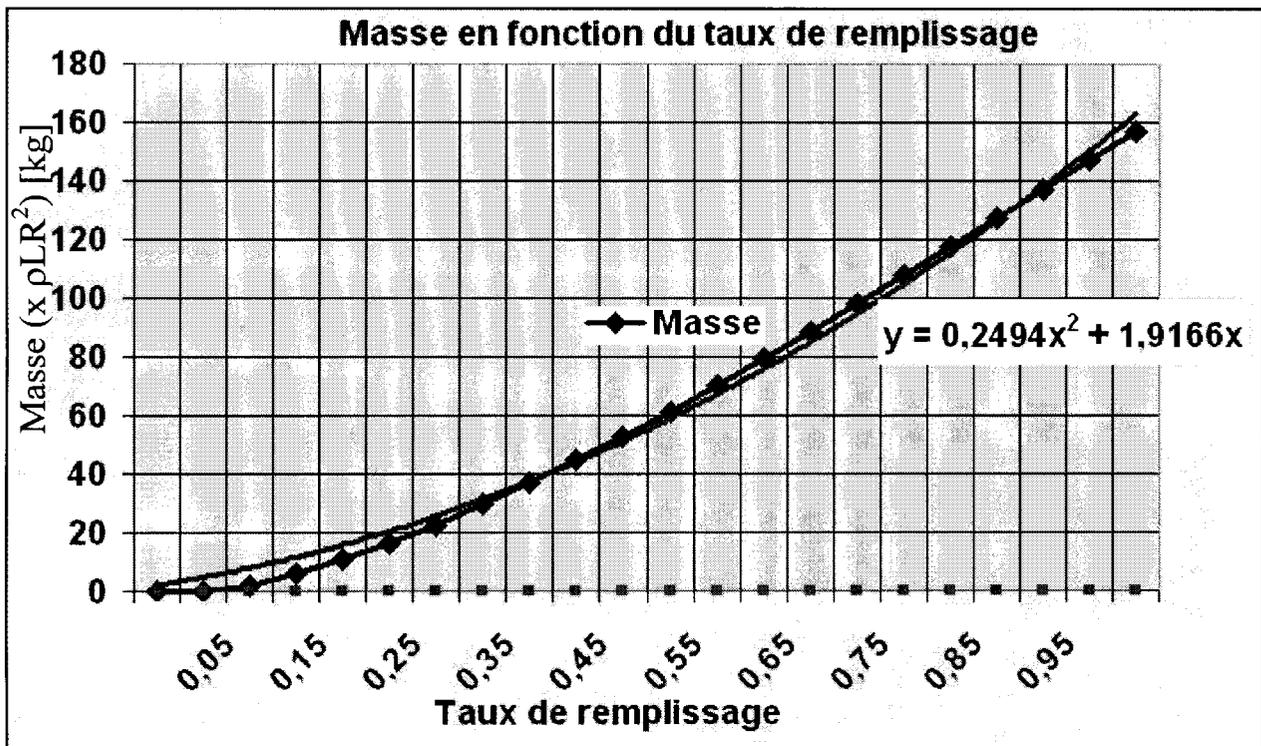


Figure 47 : Evolution de la masse en fonction du taux de charge.

On a relation $m_d = \rho LR^2 (0,25\tau^2 + 1,92\tau)$ (4.3.8)

4.4. Etude de l'influence de l'excès d'air

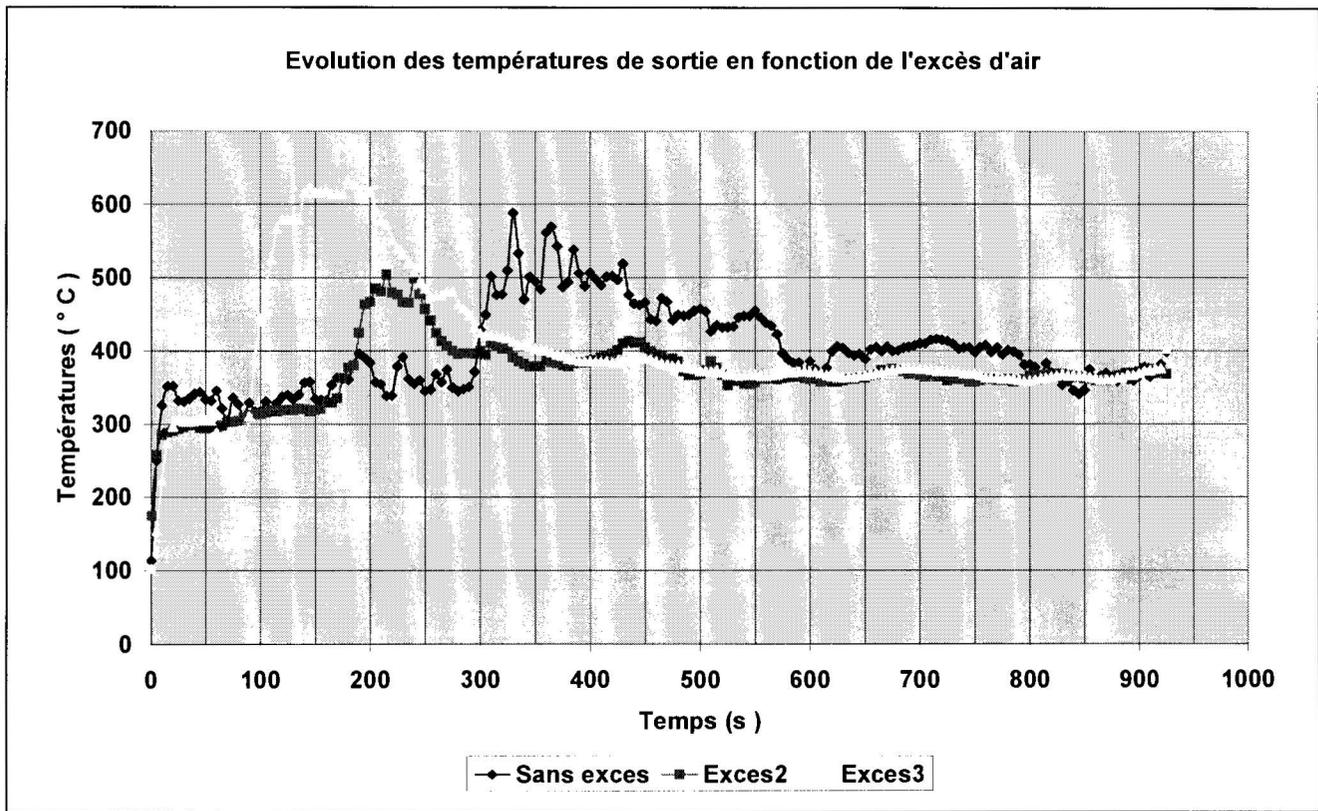


Figure 48 : Températures en sortie de la chambre de combustion en fonction du temps et à différents excès d'air.

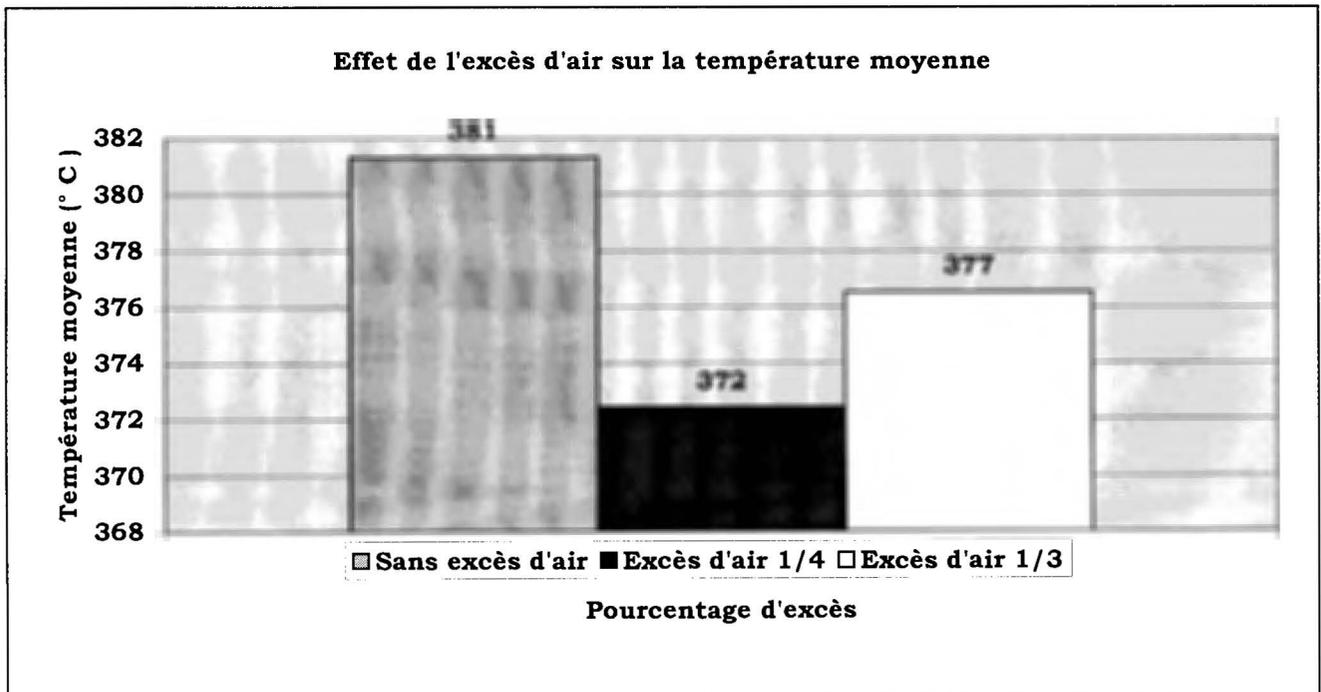


Figure 49 : Températures moyennes du gaz à la sortie de chambre de combustion primaire en fonction de l'excès d'air.

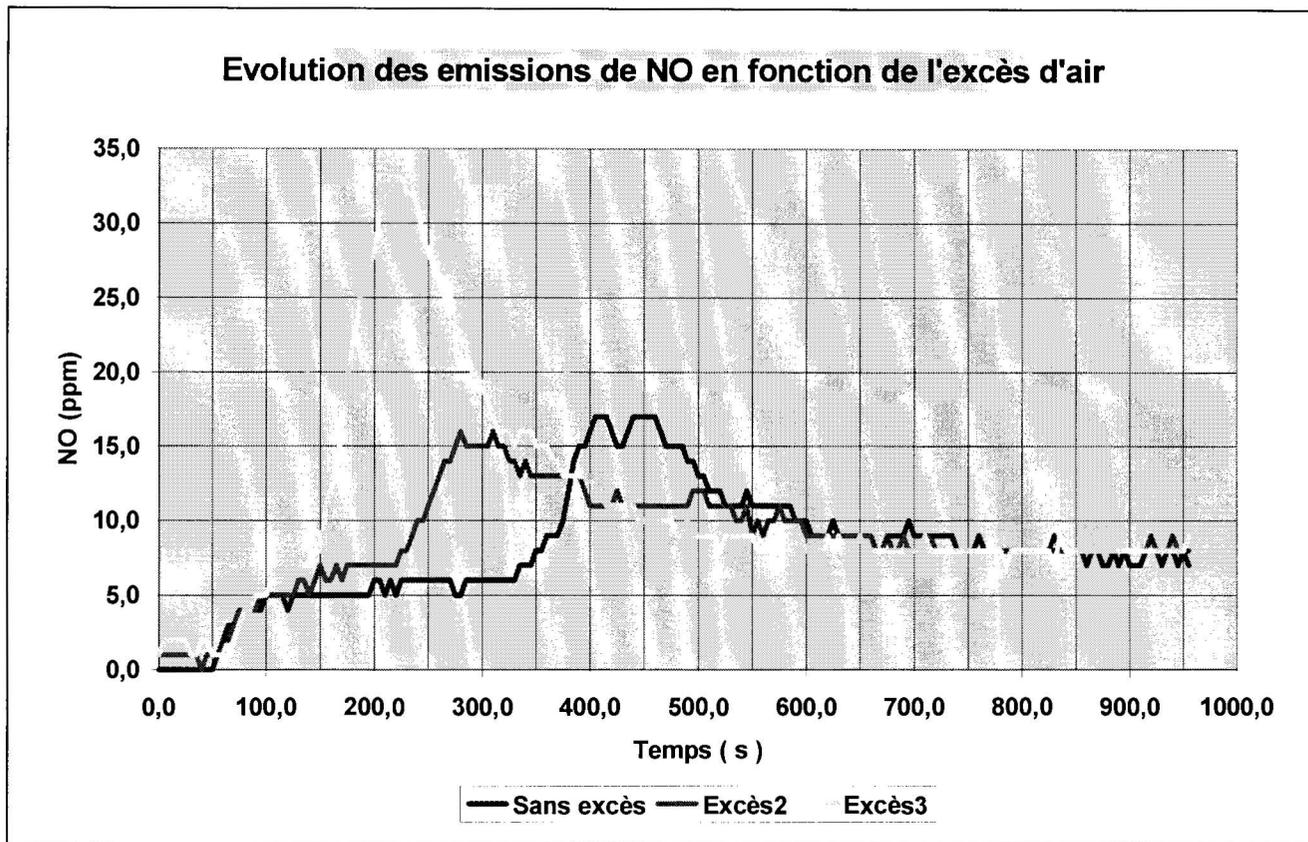


Figure 50 : Emissions de NO en fonction du temps à différents excès d'air.

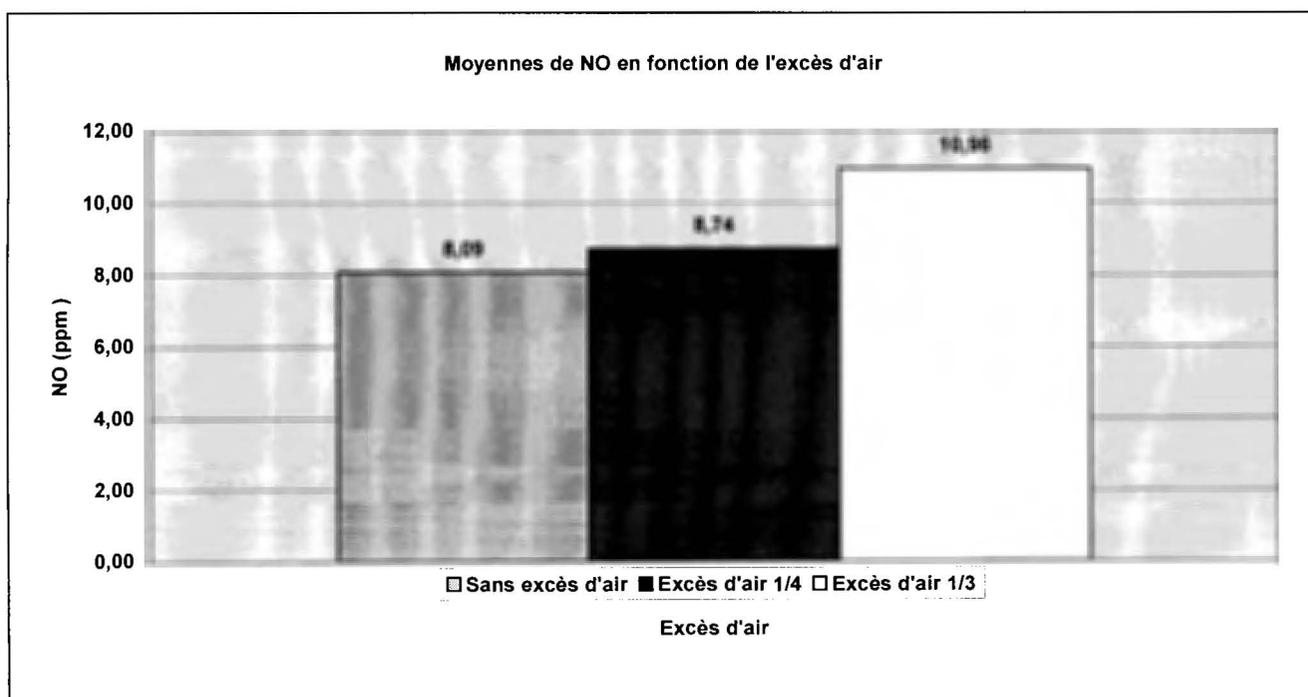


Figure 51 : Moyennes de NO à différents excès d'air.

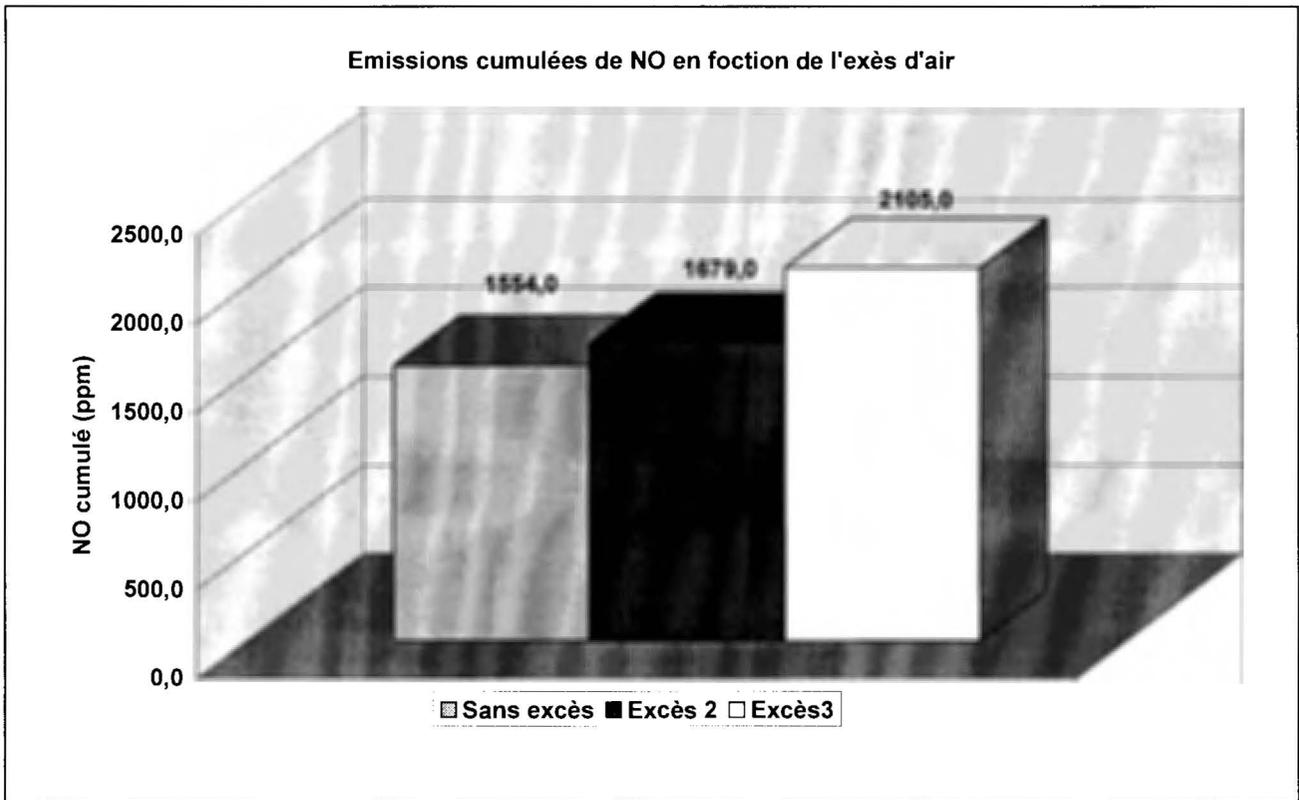


Figure 52 : Emissions cumulées de NO en fonction de l'excès d'air.

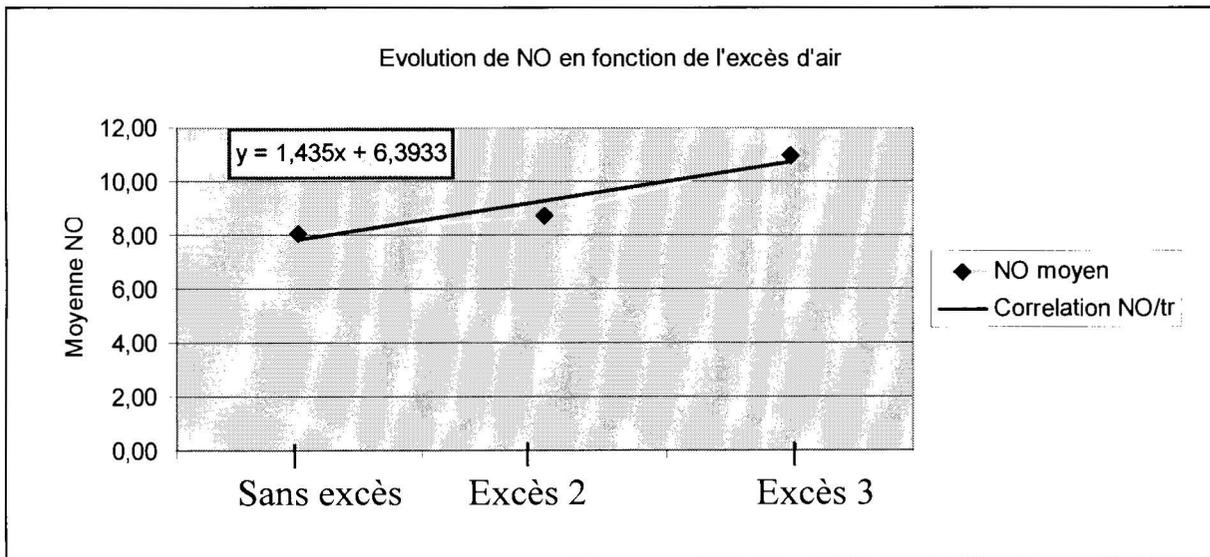


Figure 53 : Corrélation NO - excès d'air.

Les émissions moyennes de NO croissent avec l'excès d'air selon la relation :

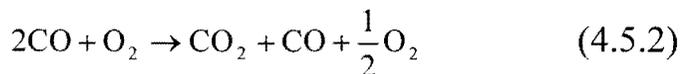
$$[\text{NO}] (\text{ppm}) = 1,44e + 6,39 \quad (4.4.1)$$

4.5. Efficacité de combustion

Lors d'une réaction de combustion, le monoxyde de (CO), un gaz toxique serait idéalement converti en dioxyde de carbone (CO₂), gaz moins dangereux selon l'équation :



Mais dans la pratique, il y a encore du CO dans les fumées, l'équation réelle est donc de la forme :



Dans la combustion du déchet modèle, c'est l'oxygène qui est le comburant, l'excès d'oxygène présent au deuxième membre de l'équation (4.5.2) n'emporte pas d'énergie. Les pertes de chaleur se trouvent dans le CO₂ et le CO en excès. Dès lors nous pouvons définir l'efficacité de la combustion comme suit :

$$\eta_c (\%) = 100 \frac{Q_{fi}}{Q_{fr}} \quad (4.5.3)$$

avec Q_{fr} : la chaleur perdue dans les fumées par CO₂ et CO et Q_{fi} la chaleur perdue dans les fumées par CO₂. Ces chaleurs sont proportionnelles aux concentrations en pourcentage de CO₂ et CO. L'équation (4.5.3) devient donc :

$$\eta_c (\%) = 100 \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}]} \quad (4.5.4)$$

Les variations de η_c en fonction de la charge à la vitesse de 0,76 tr/min sont données en figure 54.

L'analyse de ces résultats montre que l'efficacité de la combustion moyenne est supérieure à 96,6%. Cette bonne efficacité permet de conclure que la combustion est optimisée.

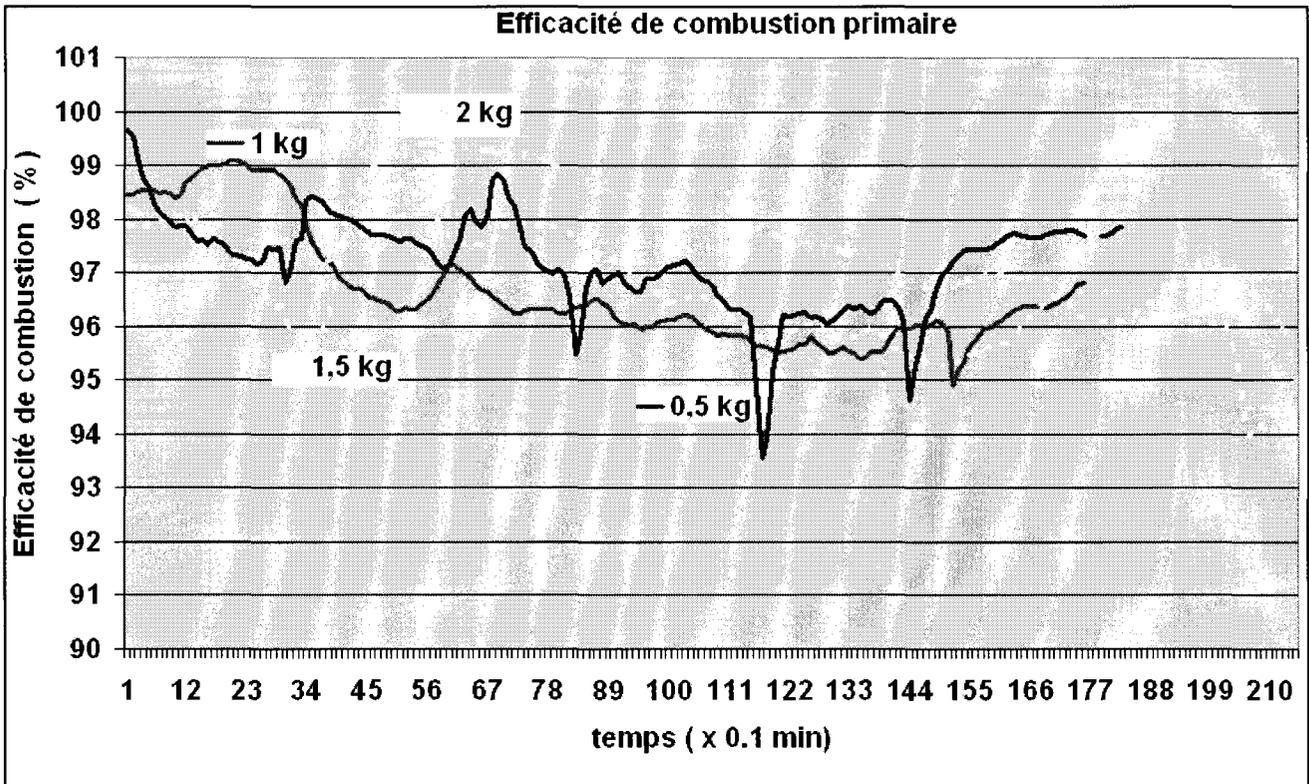


Figure 54 : Evolution de l'efficacité de combustion de la chambre de combustion primaire en fonction du temps, à différentes charges.

Les efficacités moyennes selon la charge sont données à la figure 54:

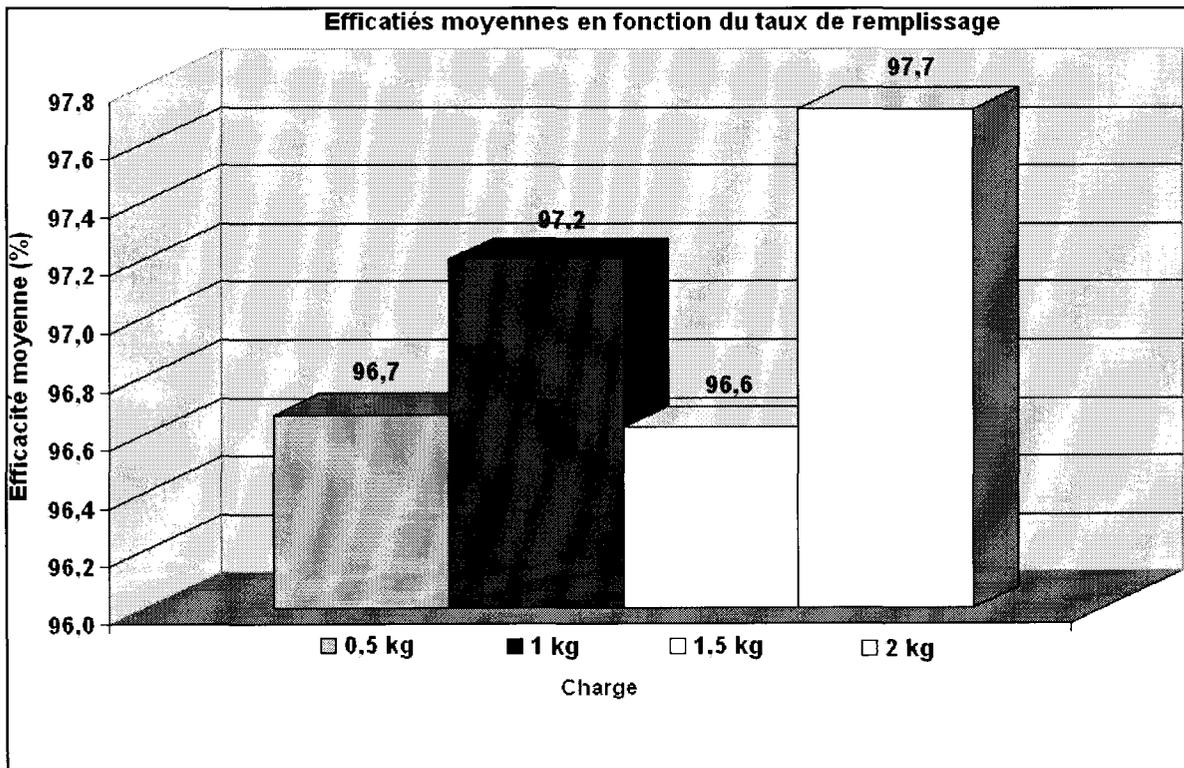


Figure 55 Efficacité de combustion moyenne de la chambre de combustion primaire à différentes charges.

4.6. Analyse synthétiques des effets des paramètres sur la température et les émissions gazeuses.

Ces expériences nous amènent aux conclusions suivantes :

Tableau 19 : synthèse des effets de la vitesse de rotation

	T1	T5	CO(ppm)	NO(ppm)	NO2	SO2	CO2(%)
W1=1,20tr/min	332,18	387,91	546,63	8,98	0	4,56	1,62
W2=0,98tr/min	292,48	338,25	508,51	7,06	0	11,88	1,49
W3=0,76tr/min	275,94	324,51	408,42	6,58	0		1,48
W4=0,54tr/min	271,03	351,67	609,69	6,74	0	5,41	1,31
W5=0,32tr/min	379,28	337,18	414,34	6,92	0	12,3	1,58

- Tous les paramètres présentent un minimum lorsque la vitesse de rotation augmente (autour de 0.76 tour par minute).
- La température maximale atteinte croît linéairement avec la charge. La corrélation suivante peut être retenue : $T_{gm} = 187,2 m_d + 570,5$ (4.3.1)
- La température moyenne croît avec la charge selon la relation :

$$T_{gmoy} = 198,44 \ln (m_d) + 384,03$$
 (4.3.2)
- Les émissions gazeuses ne montrent pas de dépendance claire à la charge.
- Les émissions de NO augmentent avec la charge et l'excès d'air.
- Le rendement de combustion à la vitesse de rotation de la chambre de combustion de 0,76 tr/min est bon : minimum des toutes les mesures à différents charges égal à 93,5%.
- Les émissions de CO et CO₂ semblent peu influencées par la charge et l'excès d'air. Mais elles présentent un minimum par rapport à la vitesse de rotation.

En prenant une masse de déchet modèle $m_d = 0$ dans les équations (4.3.1) et (4.3.3) à (4.3.5), on obtient respectivement :

$$\downarrow T_{gm} = 570,5 \text{ °C}$$

$$\downarrow [\text{NO}] = 4,565 \text{ ppm}$$

$$\downarrow [\text{CO}_2] = 1,28 \text{ %}$$

$$\downarrow [\text{SO}_2] = 7,92$$

Comparons ces résultats à ceux donnés par les essais à vide (ce qui correspond à une masse de combustible nulle dans le four) :

Tableau 20 : Comparaison de quelques paramètres à vide expérimentaux et modélisés.

Paramètre	T ₅ (°C)	[NO] (ppm)	[SO ₂] (ppm)	CO ₂ (%)
Expérience	488	5,72	9,23	1,56
Modèles	570,5	4,56	7,92	1,28
Précision relative (*) (%)	16,9	20,3	14,2	17,9

On constate que la température maximale prévue par le modèle n'est pas atteinte dans la pratique. Cela s'explique par la présence dans le gaz d'imbrûlés non étudiés (par exemple l'hydrogène, la vapeur d'eau, etc).

Les concentrations des émissions gazeuses observées dans la pratique sont un peu plus élevées que celles prédites par les modèles. La raison en est que le fioul domestique contient du soufre et du carbone. Le NO à vide provient de l'azote de l'air brûlé. Les modèles proposés ont en accord avec l'expérience avec une précision relative de l'ordre de 20%.

Ces résultats viennent confirmer ceux déjà obtenus par X. ZHOU, KERDSUWAN, Y et T. ROGAUME, J. TEZANOU et A. BARHE. Ils avaient déjà mis en évidence certaines de ces tendances. Toutefois l'effet de la vitesse de rotation n'a jamais à notre connaissance été étudié.

L'opposition du public à l'incinération des déchets vient surtout du fait des pollutions engendrées par les pluies acides, l'effet de serre, les métaux lourds, les dioxines et les furanes. Or les pluies acides viennent des émissions de N₂O et NO_x, que l'on considère comme les plus grands gaz polluants. L'effet de serre et le réchauffement de la planète eux trouvent leurs origines dans les émissions de CO et CO₂. Ce sont donc en priorité les émissions d'oxydes d'azote et CO qu'il faut

$$* \text{ Précision relative} = \left| \frac{X_{\text{théorique}} - X_{\text{Expérimentale}}}{X_{\text{Expérimentale}}} \right|, \text{ où } X \text{ est le paramètre étudié.}$$

minimiser. Les travaux de nos prédécesseurs [53, 54, 55, 56, 57 et 58] ont montré qu'une bonne destruction des oxydes d'azote exige une température suffisante. Comme cette dernière est directement liée à la charge, nous préconisons de fixer d'abord la charge en fonction de la température de fonctionnement voulue. Ensuite, on prendra la vitesse de rotation optimale. Enfin on agira sur l'excès d'air pour minimiser les émissions polluantes.

Remarquons toutefois que notre estimation de l'excès d'air est approximative. Nous ne disposons pas d'appareil de mesure de débit d'air.

4.7. Schéma de la combustion du déchet ménager.

L'analyse de la combustion séparée du bois, du carton et du plastique, ainsi que leur confrontation avec la combustion à vide et celle du déchet modèle nous a donné les résultats suivants :

4.7.1. Combustion du bois seul

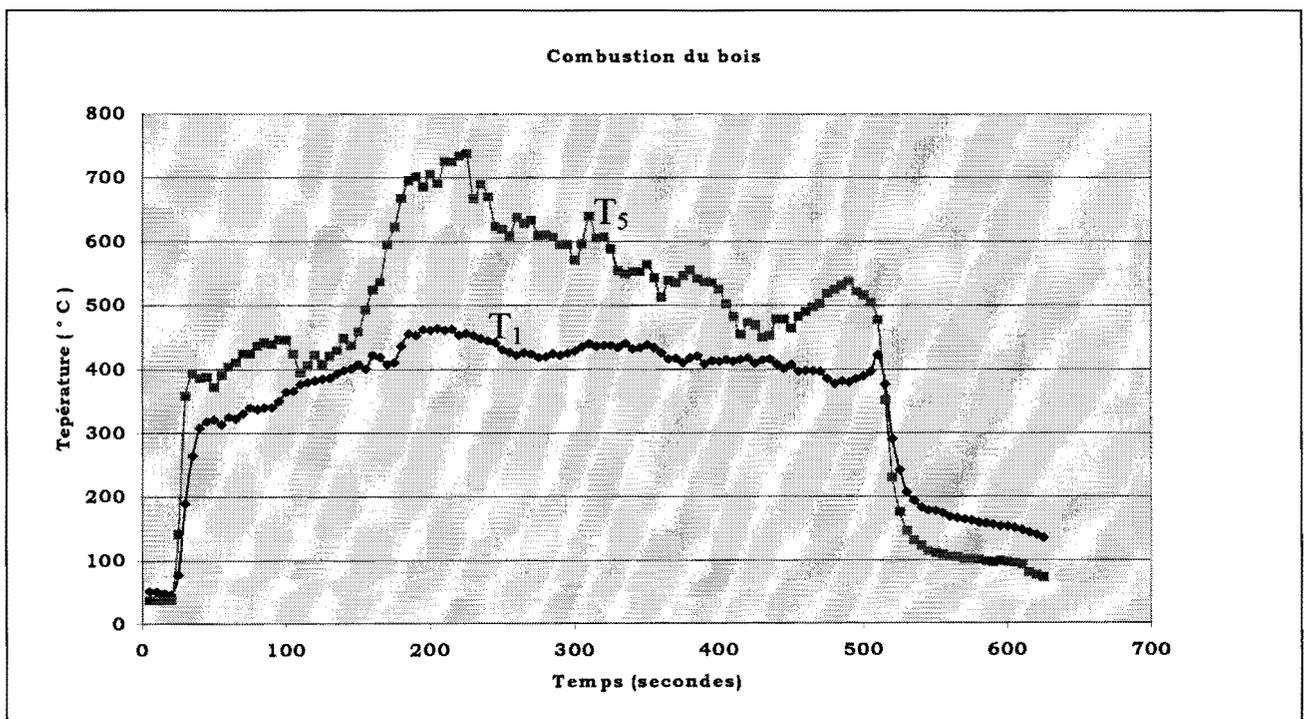


Figure 56 : Evolution des températures T_1 et T_5 lors de la combustion du bois.

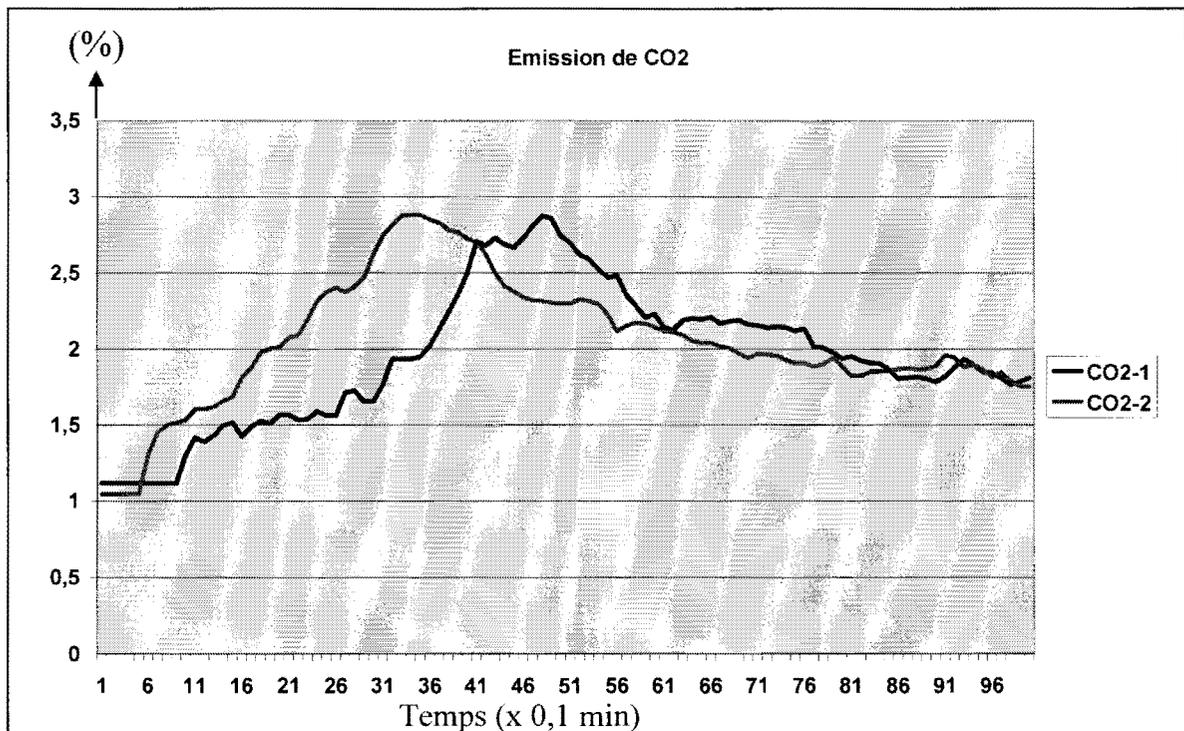


Figure 57 : Emission de CO₂ lors de la combustion du bois.

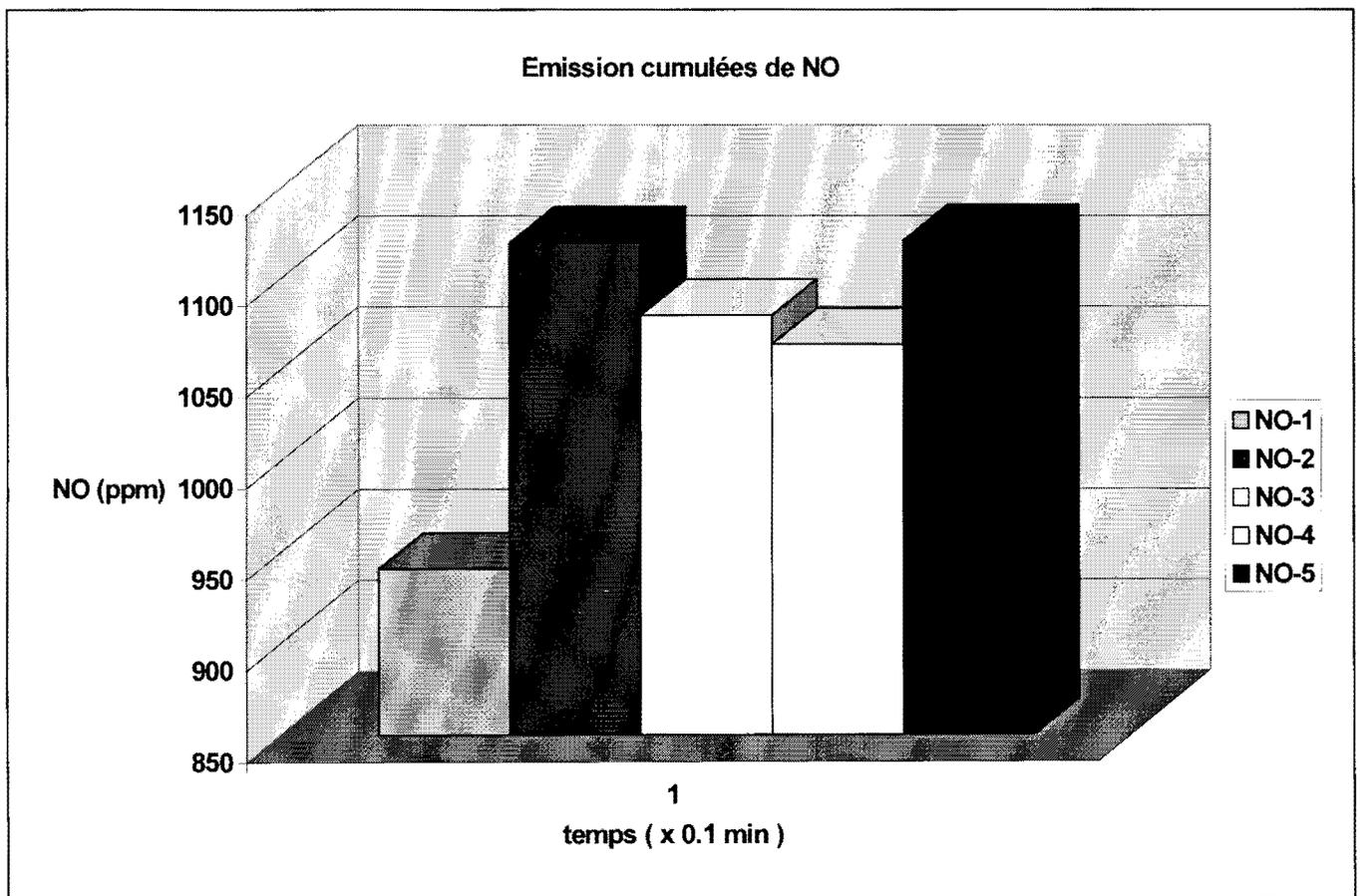


Figure 58 : Emissions cumulées de NO lors de la combustion du bois.

4.7.2. Combustion du carton seul

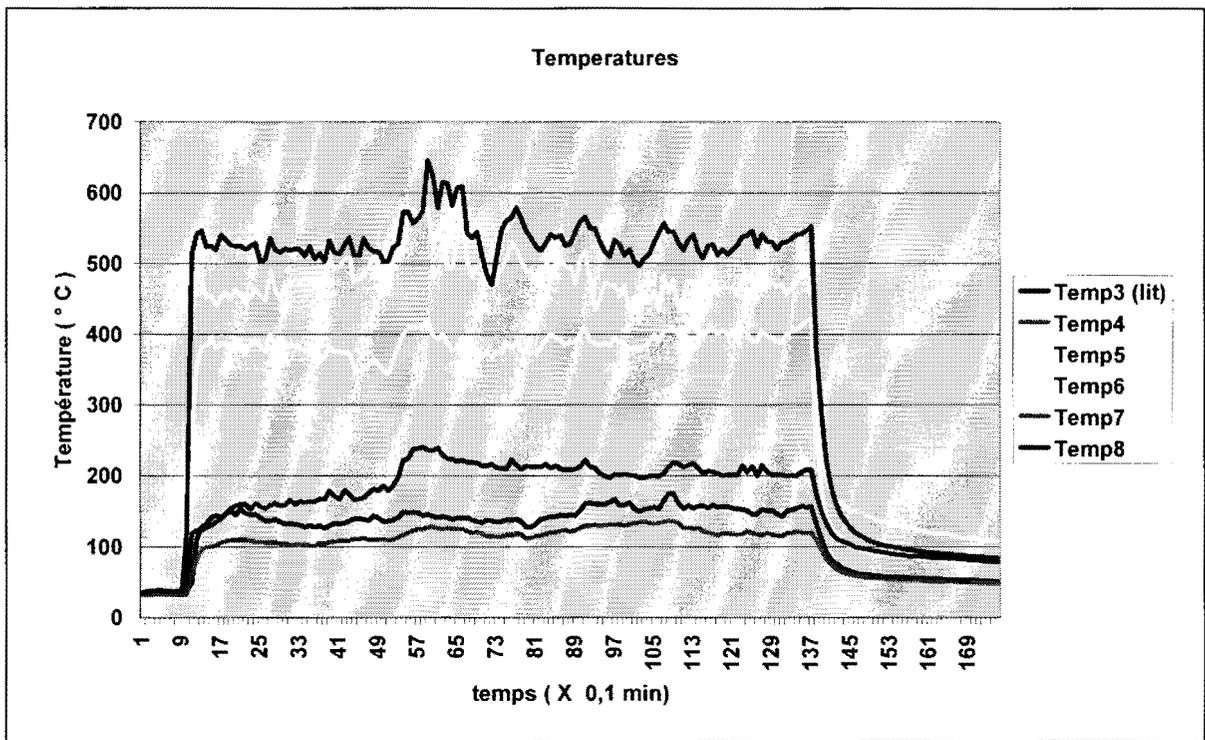


Figure 59 : Evolution des températures lors de la combustion du carton.

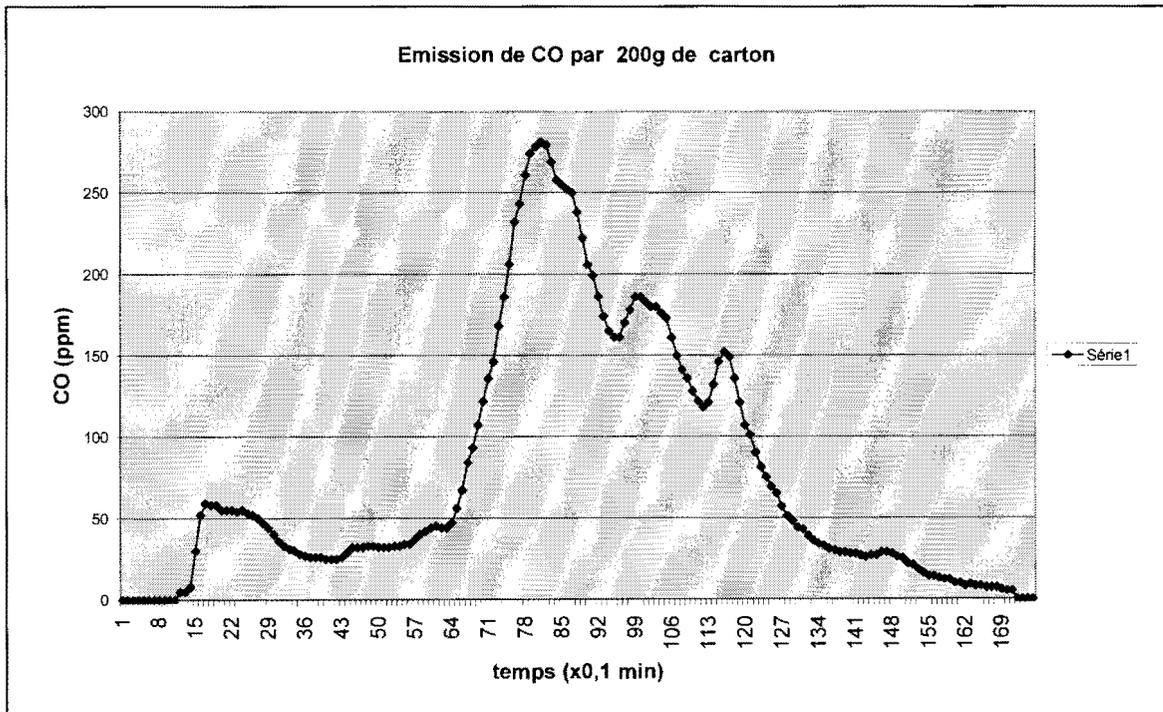


Figure 60 : Emission lors de la combustion du carton.

On remarque donc que la combustion du carton seul donne des résultats semblables à ceux du bois seul : on constate un net maximum dans la température et les émissions gazeuses.

Le plastique ne se dégrade pas dans le four. Il fond plutôt et adhère aux parois du four, ce qui donne des courbes plates comme celles obtenues lors des essais de combustion à vide :

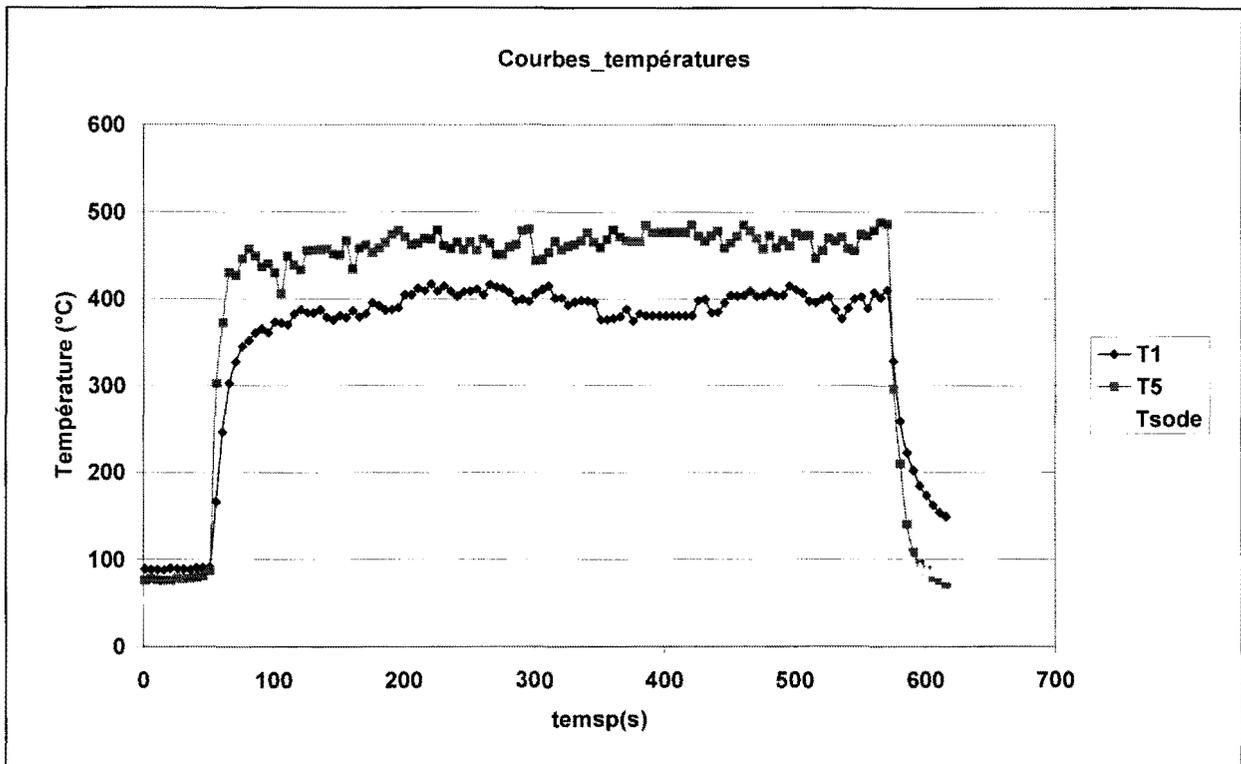


Figure 61 : Courbes des températures du four fonctionnant à vide.

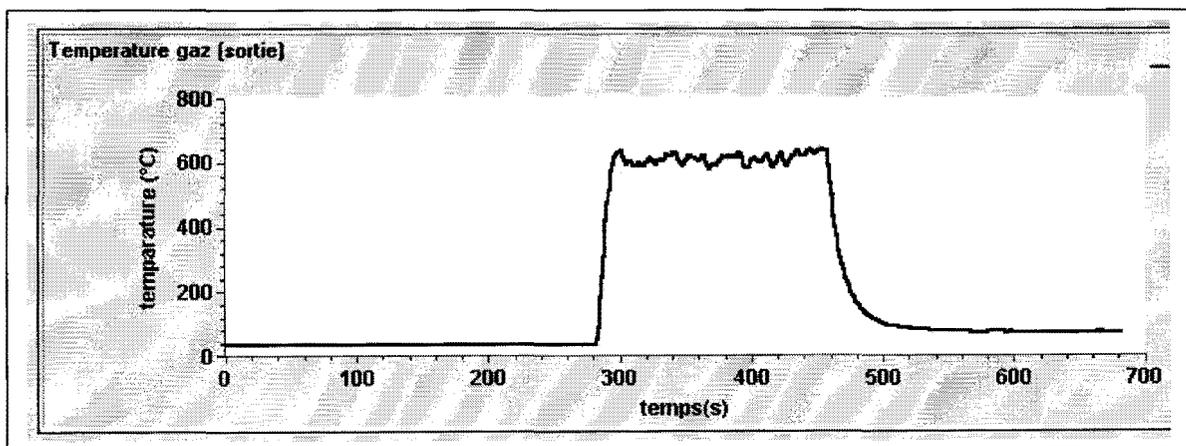
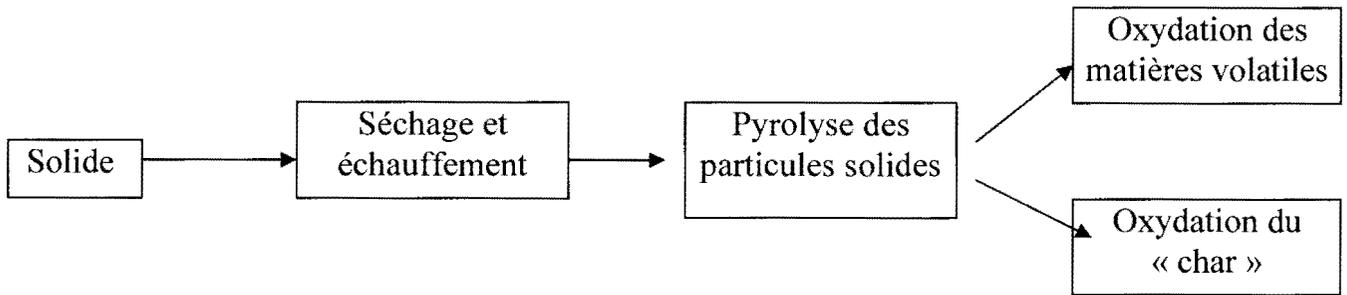


Figure 62: Evolution de la température de sortie à vide.

Nous avons proposé le schéma de combustion suivant pour le bois ou le plastique seul, comme l'a déjà fait TILMAN [35]:



Le pic que l'on observe commence avec la combustion (oxydation) des matières volatiles.

4.7.3. Combustion du déchet modèle

Dans la combustion du déchet modèle, on constate l'apparition de deux maximums parfaitement reproductibles lors de nos expériences. La combustion du déchet modèle présente d'abord un premier pic, puis un second pic de température moins élevée comme le montre la figure ci-dessous :

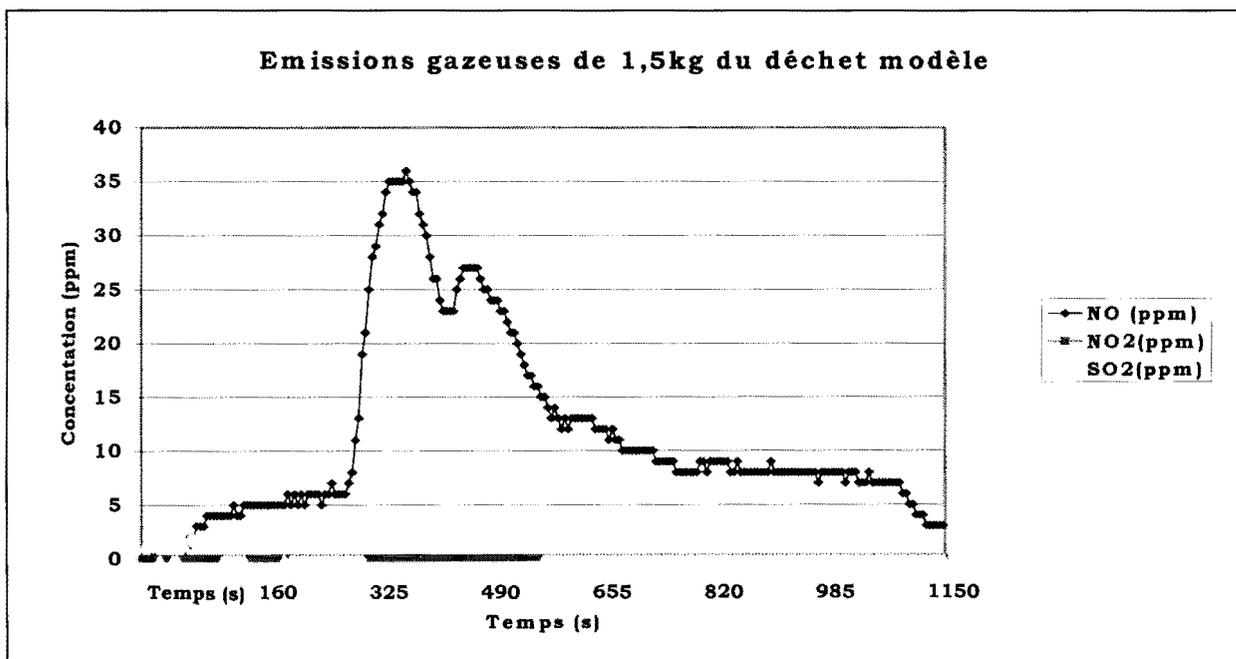


Figure 63 : Les deux pics des émissions gazeuses dans la combustion du déchet modèle en fonction du temps.

L'observation de l'ensemble des paramètres de la combustion du déchet modèle sur la figure 64 montre qu'à ces pics se produit simultanément :

- une plus grande consommation d'oxygène (faible concentration d'oxygène dans les fumées),
- une augmentation de la concentration de NO, SO₂, CO₂ dans les fumées,
- une augmentation de la température.

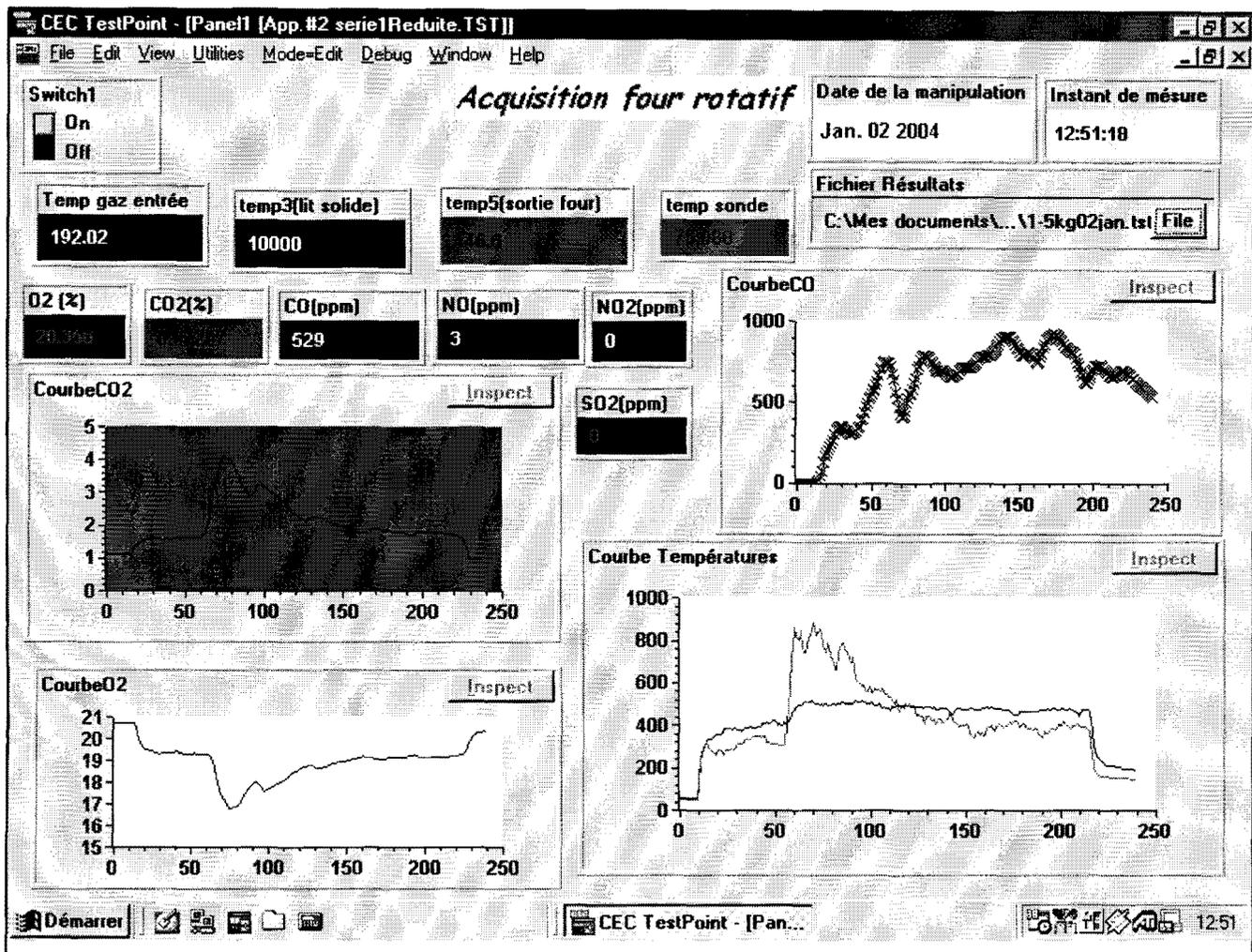


Figure 64 : Ecran de l'acquisition lors de la combustion de 1,5 kg du déchet modèle.

Le premier pic correspond à la pyrolyse du bois. Une partie de composants élémentaires (carbone, azote, soufre) sont oxydés et se volatilisent, le charbon est formé. Le deuxième pic correspond à l'oxydation du charbon, en moindre quantité qu'avant, c'est pour cela que le deuxième pic est moins prononcé que le premier.

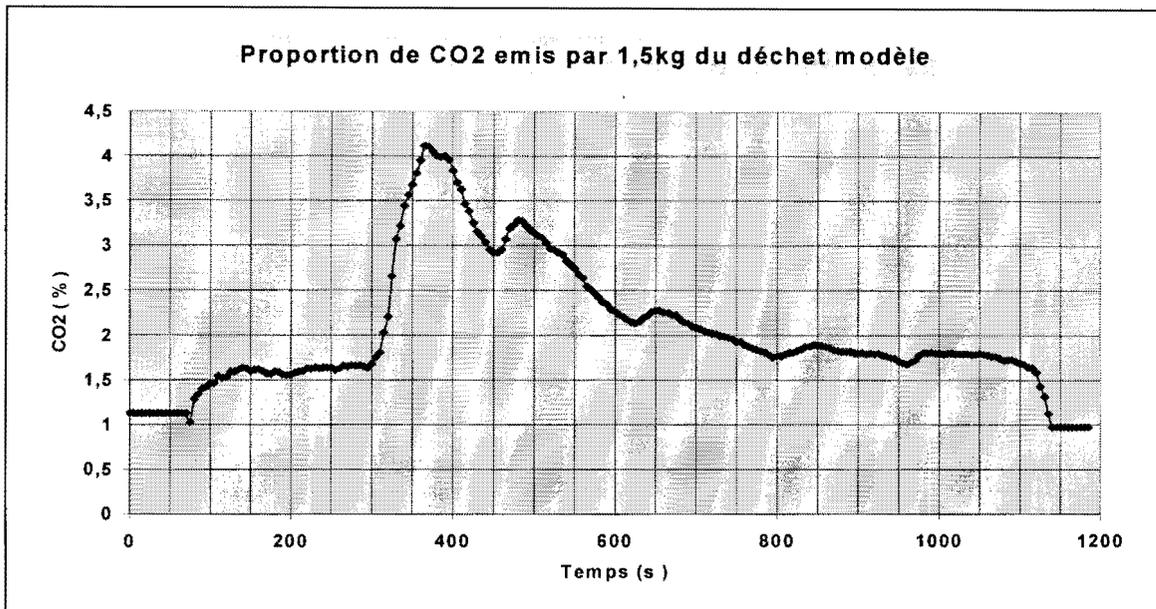


Figure 65 : Pics de l'émission de gaz carbonique par le déchet modèle en fonction du temps.

Pendant le même temps on enregistre une croissance de l'émission de CO après le deuxième pic comme le montre la figure ci-dessous :

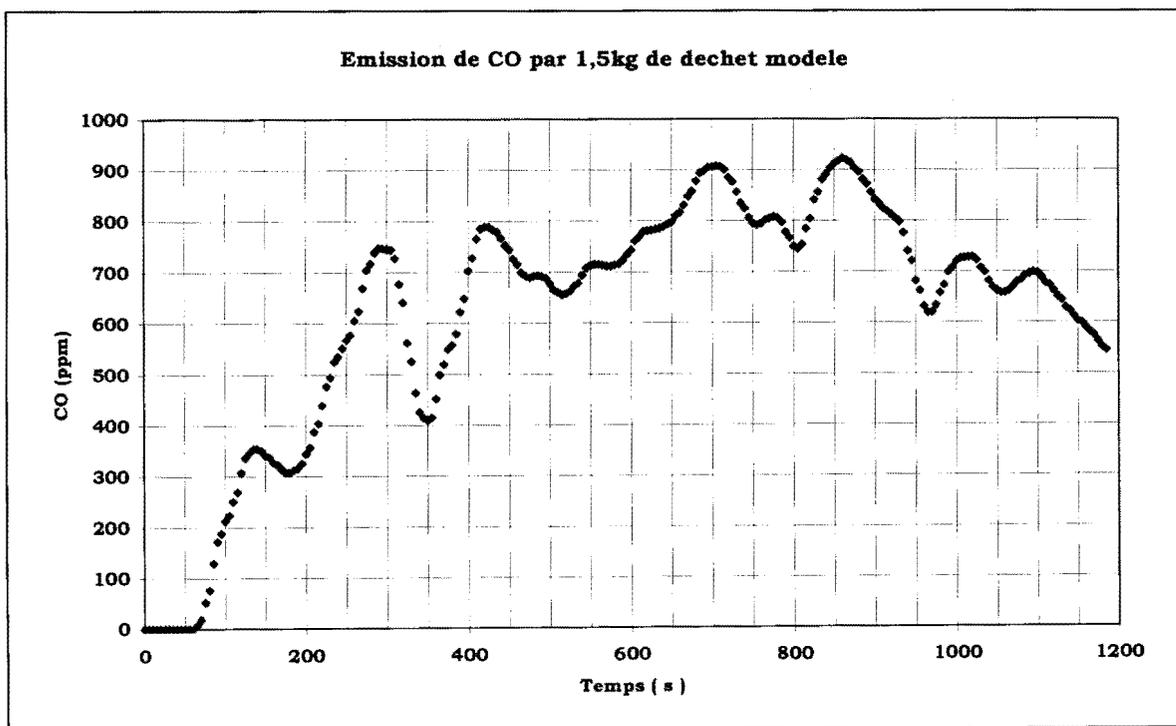


Figure 66 : Emission de CO par le déchet modèle en fonction du temps de combustion.

Sur la base de ces résultats, nous proposons les étapes suivantes pour l'incinération du déchet modèle :

- 1^{ère} étape : séchage des constituants.
- 2^{ème} étape : pyrolyse du bois et du carton, formation des gaz volatils.
- 3^{ème} étape : formation du charbon et oxydation des gaz volatils. Cela correspond au premier pic des émissions de CO₂ et NO.
- 4^{ème} étape : oxydation du charbon, cela correspond au deuxième pic.

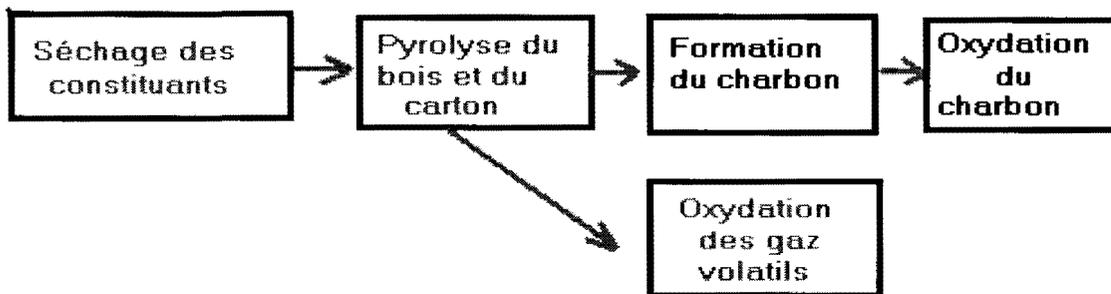


Figure 67 : Schéma de l'incinération du déchet modèle.

Chapitre 5 : Analyse thermique et modélisation de la combustion des déchets.

5.1. Introduction

Dans la conception d'un four thermique, il y a quatre aspects fondamentaux à considérer [34] : le transfert d'énergies dans le four, le transfert de masse lors du déplacement des matériaux dans le four, le transfert de masse du fioul et les réactions chimiques.

Le transfert d'énergie est l'un des aspects les plus importants parmi les quatre parce que dans la plupart des cas, c'est le transfert d'énergie qui limite les performances du four rotatif. On peut en juger par l'abondance de la littérature à ce sujet.

Le transfert de masse dans un four rotatif avait été modélisé pour la première fois par SEAMAN [59] en 1951, sur la base des mesures faites par SULLIVAN et al. [60] en 1927. Le sujet du transfert de masse a ensuite été négligé jusqu'à 1998 lorsque JANUARY et al. [15] ont repris ce sujet et étudié le transfert de masse entre le gaz et le solide. HEYDENRYCH [³¹], a ensuite proposé une nouvelle méthode pour modéliser le transfert de masse et les réactions dans un cylindre en rotation.

Les réactions chimiques sont des transformations des espèces de départ en d'autres. Par exemple, partant du carbone solide contenu dans les déchets la combustion nous donne du gaz carbonique, ce qui est une transformation solide-gaz donnant lieu aux transferts d'espèces chimiques du milieu solide (lit) au milieu gazeux.

Dans ce chapitre, nous allons étudier ces quatre aspects en trois parties, en groupant les transferts de masse du gaz et le transfert de masse du lit solide et celui du combustible d'appoint (gas-oil) dans un seul modèle.

5.2. Modèles de transfert dans le four rotatif.

5.2.1. Définition:

La modélisation mathématique c'est le processus de la formulation et de la résolution des problèmes du monde réel à l'aide des Mathématiques [61]. A cet effet on doit normalement décrire un phénomène ou un comportement réel en termes mathématiques.

Elle se fait en cinq étapes :

- Identification du problème.
- Description du phénomène.
- Développement du modèle mathématique.
- Résolution et validation du modèle.
- Interprétation et utilisation du modèle.

5.2.2. Position du problème.

Le problème qui nous préoccupe ici, est celui des émissions polluantes lors de la combustion des déchets ménagers dans un four rotatif. Nous en avons fait la description aux chapitres 1, 2, 3 et 4 précédents. Le présent chapitre est ainsi consacré à la formulation du modèle mathématique.

Afin de pouvoir modéliser les transferts de masses et d'énergie dans le four rotatif, nous devons d'abord déterminer les paramètres à prendre en compte. Pour cela nous allons commencer par déterminer les vitesses de déplacement des particules le long de l'axe du cylindre. En considérant les divers types d'échanges de masses et d'énergie pouvant avoir lieu dans la chambre de combustion ainsi que la géométrie de la chambre de combustion, nous arrêterons les paramètres à étudier ainsi que les modèles de transferts à appliquer à notre four.

L'incinération des déchets dans un four rotatif est un phénomène fort complexe du fait de la composition hétéroclite de déchets, la variabilité de l'état physique des déchets (humidité, granulométrie, densité apparente, etc.), les conditions opératoires du four (température initiale, débit thermique des brûleurs, vitesse de rotation du four,

inclinaison du four, etc.). Il n'est donc pas possible de prendre en compte tous les paramètres agissant dans le fonctionnement du four. On doit donc déterminer les paramètres les plus importants pour la modélisation.

Pour commencer, nous avons donc procédé à l'expérience suivante :

1) Chargement de 20 particules représentatives du déchet réparti comme suit :

Tableau 21 : Particules d'essai pour détermination des vitesses transversales.

Constituant	1 cm x 1 cm	4 cm x 4 cm
Bois	5	5
Carton	3	3
Plastique	2	2

2) Mise en route du four avec ses brûleurs privés de fuel (dans cette expérience, le déchet ne brûle pas et nous avons juste la traduction de son mouvement de rotation-translation).

3) Après plusieurs tours de rotation, nous avons mesuré la position des différentes particules et obtenu les résultats suivants :

Tableau 22: Positions des particules dans le four rotatif.

Constituant	1 cm x 1 cm	4 cm x 4 cm
Bois (position en cm)	31, 27, 31, 10, 13	32, 28, 27, 18, 9
Carton (position en cm)	45, 26, 21	17, 7, 12
Plastique (position en cm)	29, 21	15, 34

Soit donc en moyenne :

Tableau 23 : Positions moyennes de chaque type de particules dans le four.

Constituant	1 cm ²	16 cm ²
Bois (position moyenne en cm)	22.4	22.8
Carton (position moyenne en cm)	30.67	12
Plastique (position moyenne en cm)	25	24.5

L'observation des gaz de combustion montre que ceux-ci traversent la chambre de combustion en l'espace de deux secondes environ. Cette chambre ayant une longueur de 1,07 m, on estime alors la vitesse des gaz de l'ordre de 0,5 m/s.

Ainsi la vitesse moyenne de l'ensemble du déchet est $u_d = 0,67$ mm/s tandis que la vitesse du gaz est de l'ordre de $u_g = 0,5$ m/s. Elle est très grande comparée à la vitesse transversale des déchets. Nous pouvons donc considérer les déchets comme étant immobiles lors des réactions de combustion avec le gaz. Le mouvement du gaz au dessus du lit solide est donc une convection forcée. Le lit solide étant poreux, une partie du gaz le traverse. En plus, il y a de l'énergie rayonnée par le gaz et celle réfléchiée par la paroi de la chambre de combustion.

Le gaz provenant du brûleur se propage en convection forcée au dessus du lit solide à la vitesse u_g . Un premier point essentiel dans la résolution d'un problème de convection est de déterminer le type d'écoulement en jeu [62] : écoulement laminaire ou turbulent.

L'observation des gaz par l'orifice d'admission de l'excès d'air montre que dans l'ensemble, c'est un mouvement ordonné, sans brassage de gaz. C'est donc un écoulement laminaire. En régime laminaire, pour un écoulement en convection forcée, on peut séparer les équations de la dynamique, de celles de la thermique. Nous découplerons donc les équations de transfert des masses de celles de transfert d'énergie [63].

Nous aurons donc à considérer :

- Les transferts de masse du lit solide, du gaz libre ainsi que ceux du gaz emprisonné au travers du lit solide : ce sera le modèle de transport.
- Les échanges d'énergie entre le gaz en convection forcée et le lit solide, entre le gaz emprisonné et le lit solide qu'il traverse, entre le lit solide et les parois du four et enfin entre gaz libre et les parois du four : ce sera le modèle thermodynamique.
- Les échanges des espèces chimiques entre le lit solide et le gaz : ce sera le modèle chimique.

Considérons le mouvement des particules solides (les déchets) et des gaz le long de l'axe du cylindre de la chambre de combustion. Une coupe transversale de ce cylindre nous donne la représentation de la figure 68.

D'une part nous avons au-dessus la zone gazeuse et en dessous le lit solide. Le lit solide est divisé en une couche active en contact avec le gaz et une couche passive collée à la paroi du four rotatif. La couche active est ainsi appelée parce qu'elle est le lieu des réactions de combustions par lesquelles les espèces solides comme le carbone, l'azote et autres sont transformées en gaz.

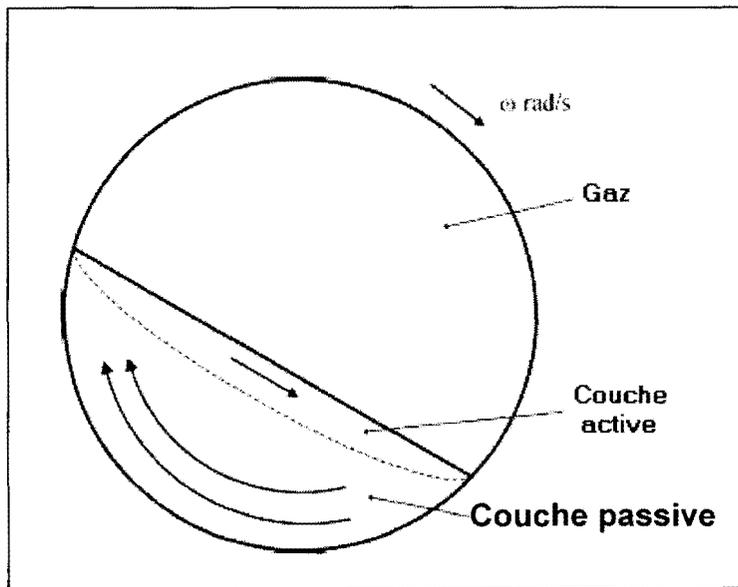


Figure 68 : Coupe transversale radiale de la chambre de combustion.

Au cours de la combustion, le gaz et solide interagissent. Dans le lit solide a lieu le séchage des matières (déchets), leur échauffement, leur refroidissement et des réactions chimiques. Simultanément, le gaz s'écoule dans le même sens que les solides. De ce fait nous devons distinguer les zones avec flamme et sans flamme car les conditions à appliquer pour la modélisation ne seront pas les mêmes. Nous supposons comme de nombreux autres auteurs, comme par exemple T. Marlin [64], qu'une fois compris et modélisé le processus dans une section transversale radiale, on peut prévoir l'ensemble du processus par la mise en série de ces petites sections transverses radiales (réacteurs ou volumes de contrôle). Les conditions initiales et les conditions aux limites (conditions de continuité des paramètres physiques entre

réacteurs adjacents) nous permettront de lier les paramètres physiques d'un réacteur à l'autre.

Dans chaque volume de contrôle, on admet les deux hypothèses suivantes :

- Le gaz de gaz d'une part et le solide d'autre part sont parfaitement remués.
- La température est la même à l'interface gaz-lit solide.

Cela nous donne des cellules « continuellement remués » dit CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor). La chambre de combustion du four sera donc divisée en plusieurs CSTR.

Chaque volume de contrôle d'ordre j , qui représente donc le CSTR n° j , est repéré par les indices $j-1$ à l'entrée et j à la sortie. F_{j-1} représentera le flux volumique du gaz à l'entrée du CSTR et F_j le flux volumique du gaz à sa sortie. Le flux volumique du solide à l'entrée et à la sortie du CSTR j sont respectivement notés G_{j-1} et G_j . Le volume du gaz contenu dans le CSTR j est noté V_g tandis que celui du solide est noté V_s . Dans le CSTR $_{j+1}$, ils sont respectivement notés V'_g et V'_s . Cela nous donne la représentation globale de deux CSTR contigus de la figure 59 ci-dessous.

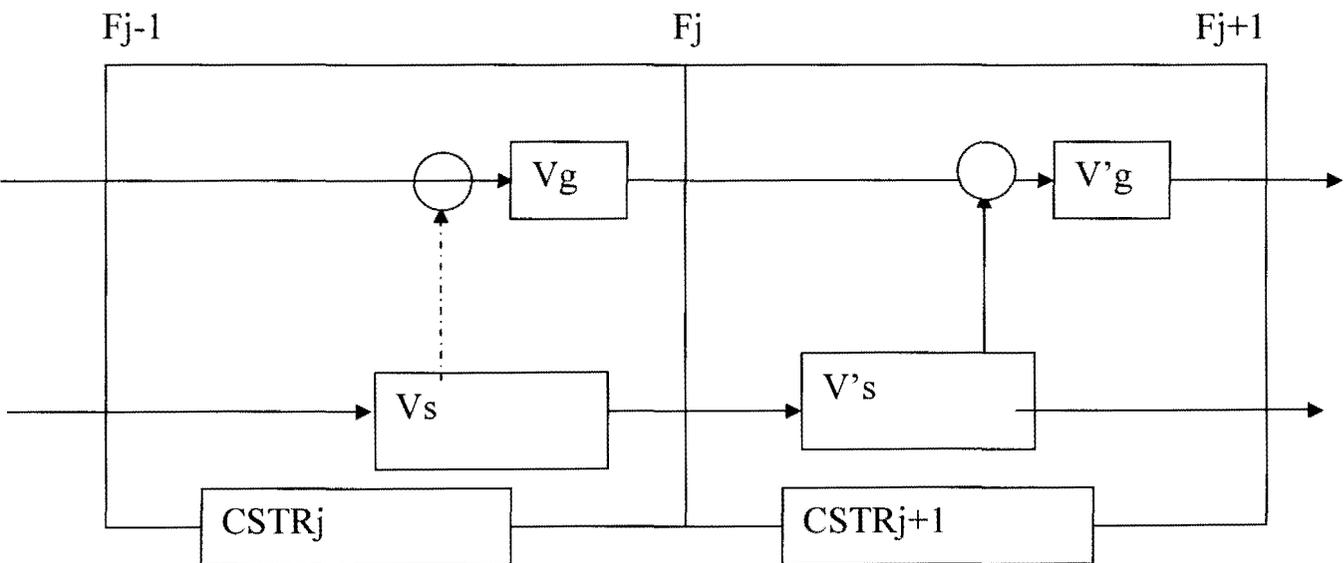


Figure 69: Schéma global du modèle CSTR

5.3. Le modèle de transport.

5.3.1. Transfert de masse du lit solide.

Dans la majeure partie du lit solide (la couche passive), les particules sont soumises aux forces de rotation circulaires, gravitationnelles (poids) et de friction. Géométriquement ces forces forment un parallélogramme variable [65]. Pendant la rotation, le déchet est entraîné vers le haut par la force résultante F quand elle est dirigée vers le haut (figure 70). A un moment, la résultante de ces forces devient horizontale et le déchet s'effondre dans le lit solide. Ce mouvement se répète périodiquement.

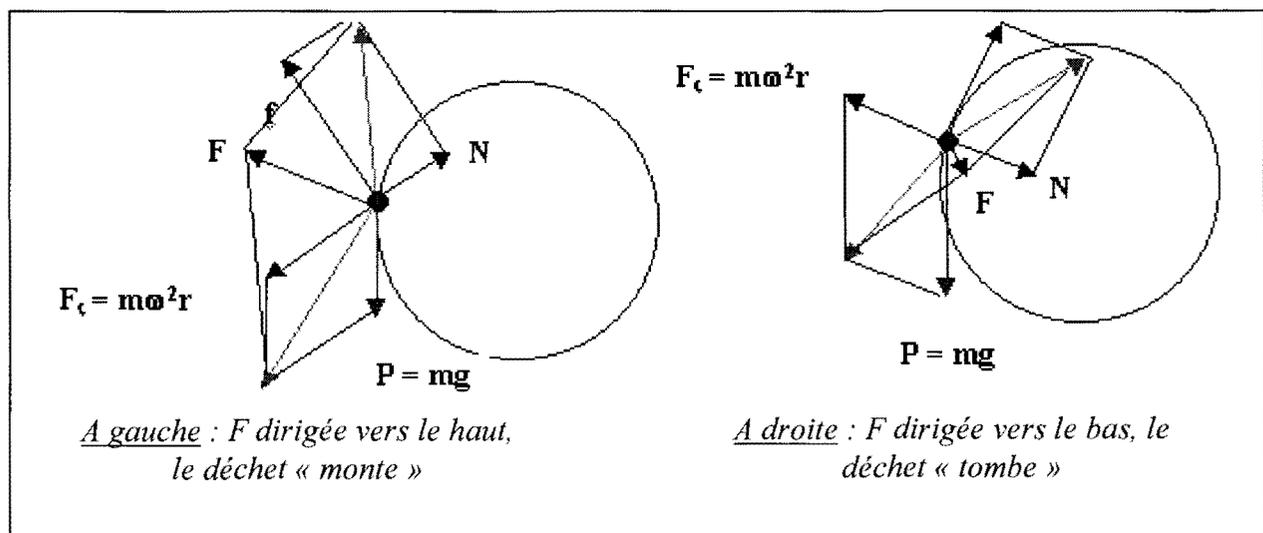


Figure 70 : Mouvement circulaire des déchets dans la chambre de combustion.

Pour le déplacement transversal des déchets, partons du temps de séjour proposé par SEAMAN [34] :

$$T_s = \frac{L \cdot \alpha \cdot f_1(\alpha)}{\omega_m \cdot D \cdot f_2(\theta)} \quad (5.3.1.1)$$

Par définition la vitesse transversale des déchets est :

$$V_s = \frac{L}{T_s}, \quad L \text{ étant la longueur de la chambre de combustion et } T_s \text{ le}$$

temps de séjour des déchets dans la chambre.

Il vient donc:

$$V_s = \frac{\omega_m \cdot D \cdot f_2(\theta)}{\alpha \cdot f_1(\alpha)} \quad (5.3.1.2)$$

ω_m :	vitesse de rotation angulaire	[rad.s ⁻¹]
D :	Diamètre du four	[m]
$f_1(\alpha)$:	paramètre d'inclinaison	[sans dimension]

5.3.2. Transfert de masse du gaz au travers du lit solide.

Nous allons quantifier le flux volumique du gaz traversant le lit solide au cours de son mouvement dans les interstices du déchet.

Considérons le déplacement des déchets sur la paroi interne de la chambre de combustion ci-dessous. Normalement le lit solide est incliné mais pour raison de commodité nous considérerons un lit solide horizontal.

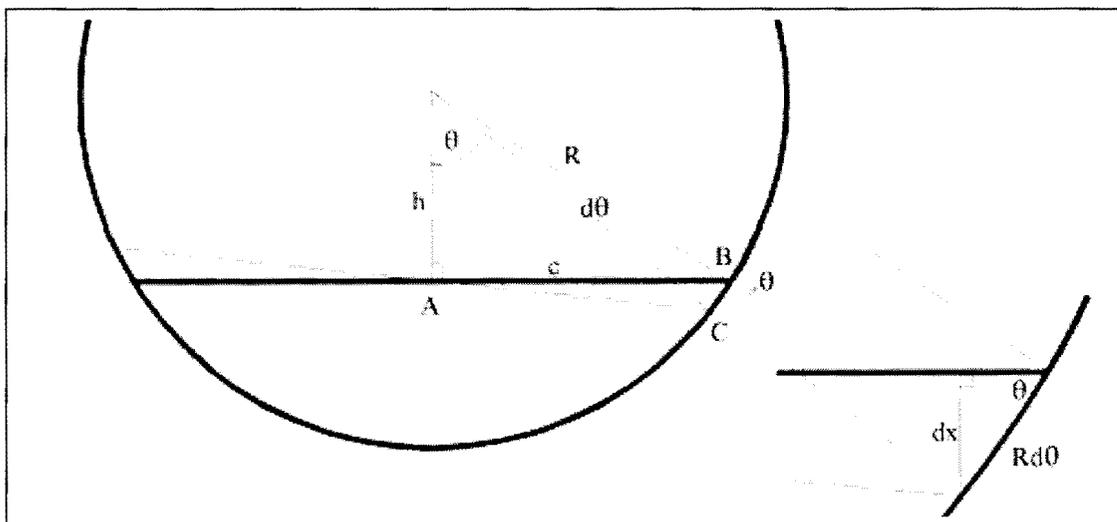


Figure 71 : Déplacement des particules sur la surface interne du four.

Soient h la distance du centre du cylindre à la surface du lit solide, R le rayon du cylindre, θ l'angle que fait la normale à la surface du lit solide avec le rayon extrême de ce lit. $d\theta$ étant l'angle élémentaire d'un déplacement, la surface élémentaire comprise entre les points A, B et C est égale à $\frac{1}{2} dx \cdot c$.

Pour un angle infiniment petit $\sin\theta \equiv dx/R.d\theta$, donc $dx = R.\sin\theta.d\theta$, soit en tenant compte de ce que $\sin\theta = c / R$, $dx = c.d\theta$. On déduit alors la surface élémentaire $dA_x = \frac{1}{2} dx . c = \frac{1}{2} c^2.d\theta$ (5.3.2.1)

Or $c^2 = R^2 - h^2$, d'où

$$dA_x = \frac{1}{2} (R^2 - h^2).d\theta \quad (5.3.2.2)$$

Nous noterons $dA_x = dA_{xgaz}$ ou dA_{xg} .

En intégrant la surface par rapport à l'angle θ qui va de de 0 à 1 radian, on obtient :

$$A_g = \frac{1}{2} \varepsilon (R^2 - h^2).(\theta_1 - \theta_0) \quad (5.3.2.3)$$

ε est le taux d'occupation du lit solide et est égal au rapport du volume du gaz par celui du lit solide.

La vitesse de rotation angulaire du cylindre est

$$\omega = (\theta_1 - \theta_0) / \Delta t \quad (5.3.2.4)$$

En remplaçant $(\theta_1 - \theta_0)$ de l'équation (5.3.2.4) dans l'équation (5.3.2.3), on obtient par unité de temps ($\Delta t = 1$) :

$$A_g = \frac{1}{2} \varepsilon (R^2 - h^2) . \omega \quad (5.3.2.5)$$

Le volume du gaz traversant le lit solide par unité de temps est égal au produit de A_g par L , L étant la longueur de la chambre de combustion. D'où le débit volumétrique du gaz dans le lit solide Q_v :

$$D_v = \frac{1}{2} \varepsilon (R^2 - h^2) . \omega . L \quad (5.3.2.6)$$

5.3.3. Transfert de masse du gaz dans l'espace libre :

A. Notion de couche limite cinématique.

Considérons l'écoulement du gaz au dessus d'une surface plane (figure 72). Les particules gazeuses qui adhèrent à la surface plane sont supposées avoir une vitesse nulle. Ces particules tendent alors à retarder le déplacement des autres particules de la couche gazeuse adjacente, qui à leur tour

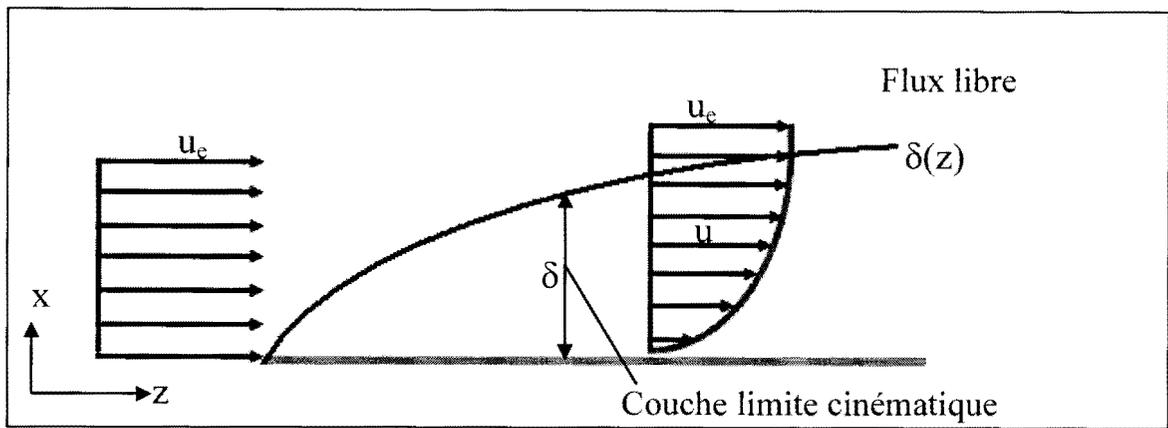


Figure 72: Développement d'une couche limite cinématique sur une surface plane (inspiré de INCROPERA et DEWITT [62]).

tendent à retarder le mouvement des particules de la couche suivante, et ainsi de suite. A une distance $x = \delta$ de la surface, cet effet devient négligeable. Ce retardement du mouvement du gaz introduit la notion de pression transverse (shear stress) τ qui agit sur une surface parallèle à direction de l'écoulement du gaz. Lorsqu'on s'éloigne dans la direction x de la surface plane, la vitesse suivant la direction z du gaz s'accroît, jusqu'à atteindre sa valeur au loin u_{ge} . L'indice « e », pour « éloigné », est utilisé ici pour désigner le flux du gaz hors de la couche limite cinématique.

Le paramètre δ est appelé « épaisseur de la couche limite ». En général on le définit comme étant distance au delà de laquelle la vitesse du fluide vaut $u = 0.99 u_e$. De ce fait le flux du gaz est caractérisé par deux régions :

- une fine couche, la couche limite, dans laquelle les gradients (variations) de vitesse et de pressions sont grands,
- une couche plus large, hors de la couche limite dans laquelle les gradients de vitesse et de pression sont négligeables.

Du fait que cette couche limite est relative à la vitesse, elle est appelée « couche limite cinématique ». Elle se développe chaque fois qu'un fluide s'écoule au dessus d'une surface. C'est une notion fondamentale dans les problèmes mettant en jeu la convection. Dans notre cas de la mécanique des fluides newtoniens, la connaissance du

gradient de la vitesse permet de trouver la pression transverse avec la relation suivante :

$$\tau_s = \mu \left. \frac{\partial u_g}{\partial x} \right|_{x=0} \tag{5.3.3.1}$$

μ : Viscosité dynamique [kg.s⁻¹.m]

B. Equations de transport en convection forcée.

Pour l'établissement des équations de transport de masse du gaz libre, nous allons considérer un mouvement en deux dimensions : on admet que la vitesse du gaz ne dépend que des coordonnées x et z. Le volume de contrôle différentiel à considérer est celui de la figure 73 ci-dessous :

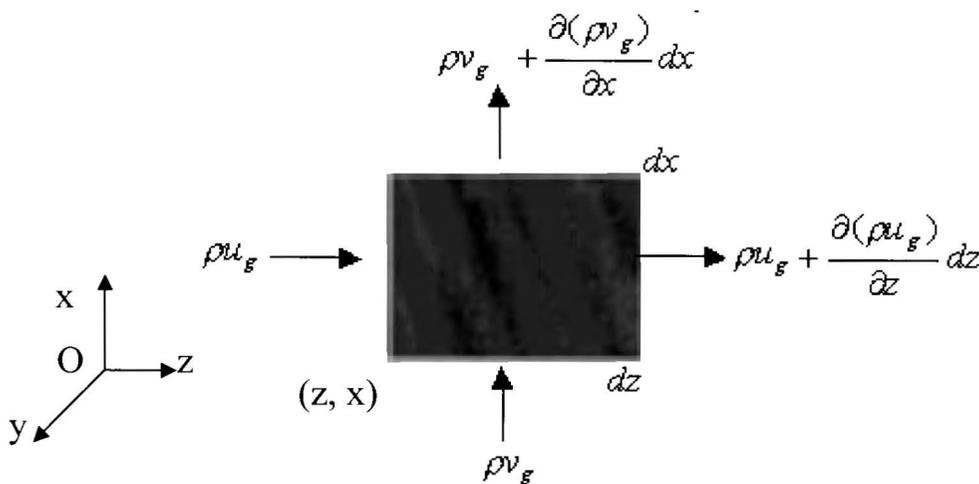


Figure 73: Volume de contrôle différentiel pour la conservation de masse [62].

B.1) La loi de la conservation de la matière...

dit que « Rien ne se perd et rien ne se crée ; tout se transforme ». Dans le cas de la convection d'un fluide, cette loi exige que le flux net du fluide à travers le volume de contrôle (flux entrant – flux sortant) soit nul. Les particules entrent et sortent du volume de contrôle uniquement par le déplacement du fluide. Prenons un coin du volume de contrôle de coordonnées (z, x), le débit massique du gaz dans la direction z vaut :

$$(\rho u_g) dx dy \tag{5.3.3.2}$$

u_g étant la norme de la vitesse moyenne du gaz dans la direction (Oz). Puisque ρ et u_g peuvent varier en fonction de la position z , nous pouvons obtenir le débit massique au point $z + dz$ en faisant un développement en série de Taylor de premier ordre :

$$\left[(\rho u_g) + \frac{\partial(\rho u_g)}{\partial z} dz \right] dx dy \quad (5.3.3.3)$$

De même, dans la direction (Ox), la norme de la vitesse moyenne étant v_g , au point x , le débit massique du gaz vaut :

$$(\rho v_g) dz dy \quad (5.3.3.4)$$

tandis qu'en $x + dx$, le développement en série de Taylor donne :

$$\left[(\rho v_g) + \frac{\partial(\rho v_g)}{\partial x} dx \right] dy dz \quad (5.3.3.5)$$

La condition de la conservation de la masse s'écrit donc :

$$(\rho u_g) dx dy + (\rho v_g) dz dy - \left[(\rho u_g) + \frac{\partial(\rho u_g)}{\partial z} dz \right] dx dy - \left[(\rho v_g) + \frac{\partial(\rho v_g)}{\partial x} dx \right] dy dz = 0$$

Après développement, les termes $(\rho u_g) dx dy$ et $(\rho v_g) dz dy$ s'éliminent, il reste donc :

$$- \left[\frac{\partial(\rho u_g)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v_g)}{\partial x} \right] dx dy dz = 0$$

soit en divisant par $-dx dy dz$ et en réordonnant les termes :

$$\frac{\partial(\rho u_g)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v_g)}{\partial x} = 0 \quad (5.3.3.6) : \text{Equation de continuité}$$

B.2) Le second principe de la dynamique newtonienne...

appliquée au volume de contrôle différentiel stipulera que la somme de toutes les forces agissant sur le volume de contrôle sera égale à la variation de la quantité de mouvement du flux net sortant du volume (flux sortant – flux entrant).

Sur le volume de contrôle agissent les forces internes proportionnelles au volume de contrôle et les forces surfaciques proportionnelles à la surface. Les forces internes incluent les forces gravitationnelles, centrifuges, magnétiques et /ou électriques.

Désignons par Z et X la résultante par unité de volume de ces forces selon les directions (Oz) et (Ox) respectivement. Les forces de surfaces notées F_s sont dues à la pression statique p et à la pression des forces visqueuses. En un point d'abscisses (z, x) la pression des forces visqueuses se décompose en deux composantes : une normale σ_{ij} et une tangentielle τ_{ij} (figure 74).

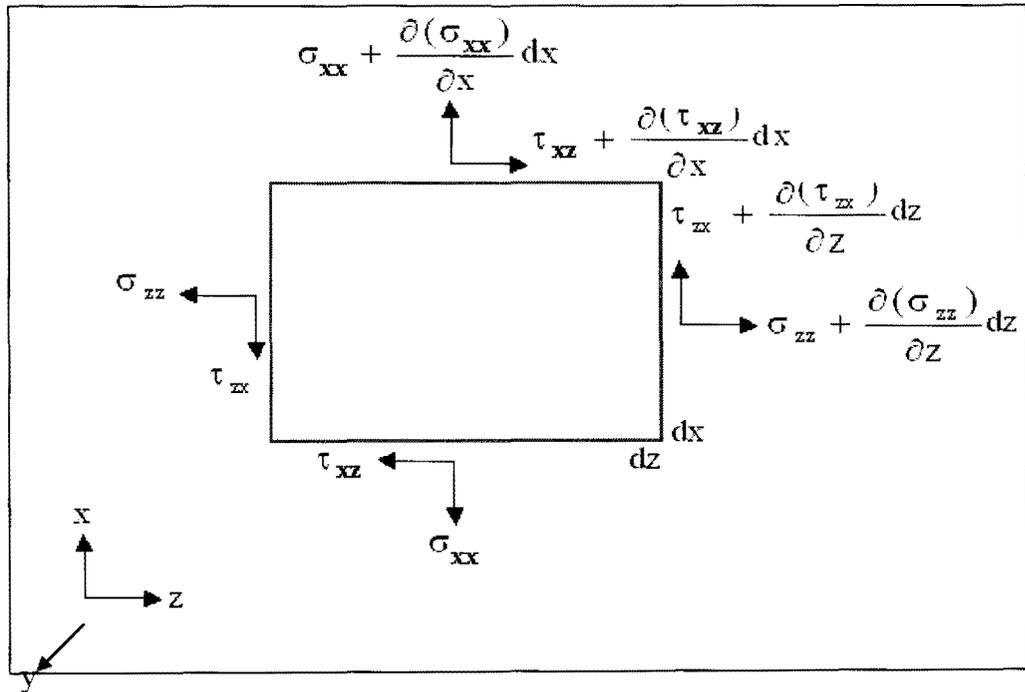


Figure 74: Composantes normale et tangentielle des forces surfaciques agissant sur le volume de contrôle différentiel $dx dy dz$ (inspiré de INCROPERA et DEWITT [62]).

Le premier indice est relatif à la normale à la direction de la composante, tandis que le deuxième indice se rapporte à direction de la composante. Chaque composante peut varier suivant les valeurs de z et x . En un point d'abscisse z du volume de contrôle les composantes des forces visqueuses sont σ_{zz} et τ_{zx} respectivement. En $z+dz$, les développements en séries de Taylor de 1^{er} ordre donnent respectivement :

$$\sigma_{zz} + \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} dz \tag{5.3.3.7}$$

$$\text{et } \tau_{zx} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} dz \tag{5.3.3.8}$$

La variation de la pression p dans la direction (Oz) produit une force élémentaire

$$F_p \text{ égale à : } \frac{\partial p}{\partial z} dz dx \tag{5.3.3.9}$$

Le flux net des forces surfaciques dans la direction (Oz) est donc:

$$F_{s,z} = [-\sigma_{zz} + (\sigma_{zz} + \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} dz)]dx - [(-\tau_{zx} + \tau_{zx} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} dz)]dz + F_p$$

Soit en développant et simplifiant :

$$F_{s,z} = \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} dzdx + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial x} dzdx - \frac{\partial p}{\partial z} dzdx, \text{ donc :}$$

$$F_{s,z} = \left(\frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial z} \right) dzdx \quad (5.3.3.10).$$

De même la résultante des forces surfaciques dans la direction (Ox) est :

$$F_{s,x} = \left(\frac{\partial(\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} \right) dzdx \quad (5.3.3.11)$$

Il nous reste maintenant à évaluer la quantité de mouvement des flux du gaz du volume de contrôle. Le flux massique du gaz à travers la surface de normale (Oz) est (ρu_g) et la quantité de mouvement correspondante est le produit du flux massique par la vitesse dans cette direction, soit:

$$p_z = (\rho u_g) u_g$$

En $z+dz$, le développement en série de Taylor donne:

$$p_{z+dz} = (\rho u_g) u_g + \frac{\partial(\rho u_g) u_g}{\partial z} dzdx$$

La variation de la quantité de mouvement dans la direction (Oz) est donc:

$$\frac{\partial(\rho u_g) u_g}{\partial z} dzdx \quad (5.3.3.12)$$

De même dans la direction (Ox), la variation de la quantité de mouvement sera:

$$\frac{\partial(\rho v_g) v_g}{\partial z} dx dz \quad (5.3.3.13)$$

La variation nette de la quantité de mouvement du volume de contrôle est donc :

$$\frac{\partial(\rho u_g) u_g}{\partial z} dzdx + \frac{\partial(\rho v_g) v_g}{\partial z} dx dz \quad (5.3.3.14)$$

En égalant la variation de la quantité de mouvement aux forces, dans la direction (Oz) et en divisant par $dzdx$, nous obtenons :

$$\frac{\partial(\rho u_g)u_g}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v_g)v_g}{\partial z} = \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial z} + Z \quad (5.3.3.15)$$

En développant les dérivées partielles du membre de gauche de l'équation (5.3.3.15) et en substituant les valeurs de l'équation de continuité (5.3.3.6), nous obtenons :

$$\rho(u_g \frac{\partial u_g}{\partial z} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial x}) = \frac{\partial(\sigma_{zz} - p)}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + Z \quad (5.3.3.16)$$

Une expression similaire est obtenue pour la direction (Ox) :

$$\rho(u_g \frac{\partial u_g}{\partial z} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial x}) = \frac{\partial(\sigma_{xx} - p)}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + X \quad (5.3.3.17)$$

Pour un fluide newtonien, ECKERT [66] a établi que :

$$\sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial u_g}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u_g}{\partial z} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \right) \quad (5.3.3.18)$$

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u_g}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u_g}{\partial z} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \right) \quad (5.3.3.19)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_g}{\partial z} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \right) \quad (5.3.3.20)$$

B.3) Approximations et conditions expérimentales : application au four.

Les équations ci-dessous décrivent les processus influençant un mouvement du gaz en deux dimensions. Cependant, il est rare que l'on doive prendre en compte tous les termes de ces équations. Nous allons donc simplifier ces équations en négligeant les termes qui peuvent l'être.

- En général, on admet que la couche limite cinématique est incompressible (la masse volumique ρ est constante).
- La viscosité dynamique μ est constante.
- Les forces de volume sont très négligeables, c'est-à-dire $Z=X=0$.
- Les approximations de la couche limite cinématique [62] s'appliquent :

$$u_g \gg v_g$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial x} \gg \frac{\partial u_g}{\partial z}, \frac{\partial v_g}{\partial x}, + \frac{\partial v_g}{\partial z}$$

c'est-à-dire que d'une part : la vitesse du gaz dans la direction perpendiculaire à l'écoulement est négligeable devant celle de l'écoulement et d'autre part : les gradients de vitesse perpendiculaires à la direction de l'écoulement du gaz sont plus grands que ceux parallèles à l'écoulement du gaz.

Il en découle que la pression dans la direction de l'écoulement est :

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \frac{\partial v_g}{\partial x} \quad (5.3.3.21)$$

L'équation de (5.3.3.6) se simplifie et devient :

$$\frac{\partial u_g}{\partial z} + \frac{\partial v_g}{\partial x} = 0 \quad (5.3.3.22) : \text{Equation de continuité}$$

En remplaçant les équations (5.3.3.18) à (5.3.3.22) dans les équations (5.3.3.16) et (5.3.3.17), on obtient après simplification :

$$u_g \frac{\partial u_g}{\partial z} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v_g \frac{\partial^2 u_g}{\partial x^2} \quad (5.3.3.23)$$

Et :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (5.3.3.24)$$

L'équation (5.3.3.24) signifie que la pression ne varie pas dans la direction normale à l'écoulement du gaz.

La forme de $p(x)$ que donne l'équation (5.3.3.23) montre qu'elle dépend la géométrie de la surface sur laquelle se produit l'écoulement gazeux. Si la surface des déchets au dessous du gaz est plus ou moins uniformisée ; ce qui a été le cas lors de nos expériences (surface des déchets chargés plus ou moins plane) l'écoulement du gaz au dessus des déchets est alors assimilable à l'écoulement d'un gaz le long une surface plane.

5.4. Modèle thermodynamique du four

Le modèle thermodynamique vise à représenter en termes mathématiques, les échanges d'énergie ayant lieu dans le four. Ces échanges impliquent des variations de température que nous allons essayer de relier aux différents paramètres opératoires. Nous avons plusieurs types d'échanges d'énergie dans le four. La figure 75 ci-dessous nous donne la subdivision du four en trois zones. Cette subdivision diffère de celle de KERDSUWAN [24] qui propose quatre zones, mais elle est plus conforme à la réalité de notre four de laboratoire. En effet la longueur de notre four est relativement petite comparée aux fours de dimensions industrielles. De plus c'est un four à chargement discontinu. Trois zones suffisent donc pour sa description.

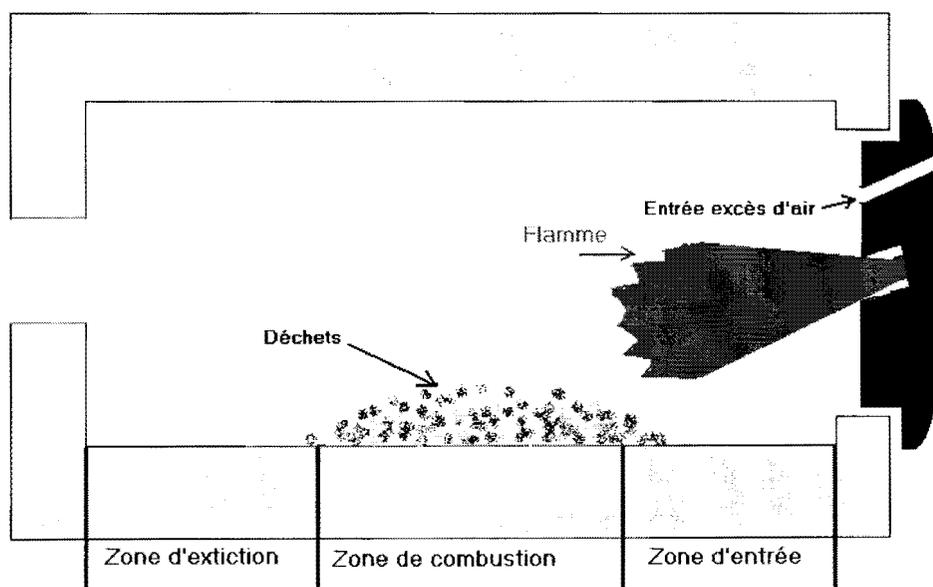


Figure 75 : Différentes zones dans le four rotatif lors d'une combustion.

Le transfert de chaleur dans un four rotatif est un phénomène complexe [24]. La chaleur est transférée du gaz au combustible solide de plusieurs manières :

- Le gaz chaud transfère directement la chaleur au lit solide et à la paroi réfractaire de la chambre de combustion (figure 76).

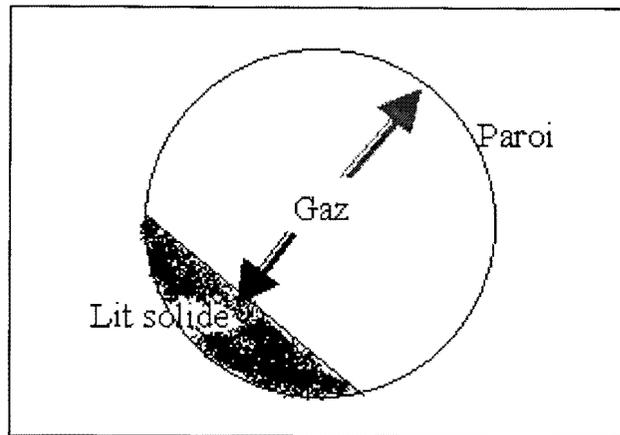


Figure 76 : Flux de chaleur partant du gaz lors d'une combustion.

- La paroi réfractaire renvoie la chaleur vers la surface exposée du lit solide au travers du gaz.

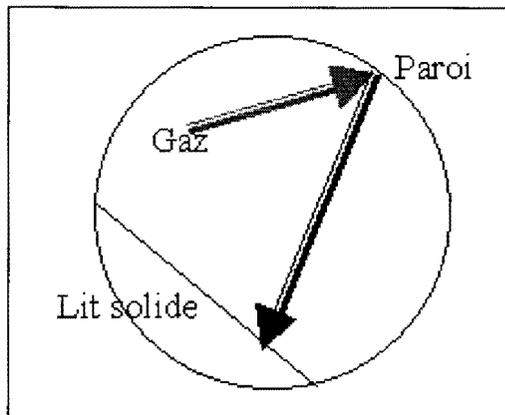


Figure 77 : Transfert de chaleur de la paroi réfractaire au lit solide.

- La paroi réfractaire au-dessous du lit solide conduit la chaleur vers la base du lit solide.

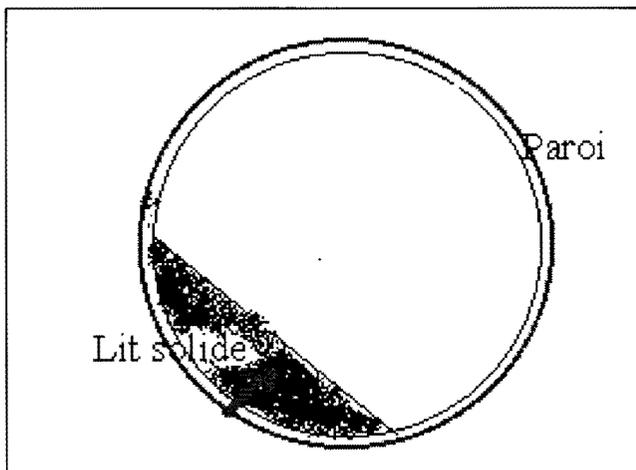


Figure 78 : Transfert de chaleur de la paroi couverte au lit solide.

➤ Les particules situées à l'extérieur du lit solide redistribuent la chaleur aux particules voisines et lorsque le lit tombe avec la rotation du four, les particules qui étaient à l'extérieur du lit sont mélangées avec celles de l'intérieur du lit qui sont plus froides et leur cèdent une partie de leur chaleur.

Ces différents transferts de chaleur dans le four sont des transferts d'énergie par rayonnement, convection et conduction. On peut les résumer dans le tableau suivant :

Tableau 24 : Différents types d'échanges d'énergie dans le four.

Désignation	Origine	Destination	Type d'énergie
Q_{gs}	Gaz	Lit solide	Rayonnement + convection
Q_{gw}	Gaz	Paroi réfractaire	Rayonnement + convection
Q_{ws}	Paroi réfractaire exposée	Lit solide	Rayonnement
Q'_{ws}	Paroi réfractaire couverte	Lit solide	Convection + conduction
Q_l	Four	Extérieur	Conduction
Q_b	Surface lit solide	Intérieur lit solide	Conduction + rayonnement

On peut regrouper tous ces échanges sur la figure ci-dessous :

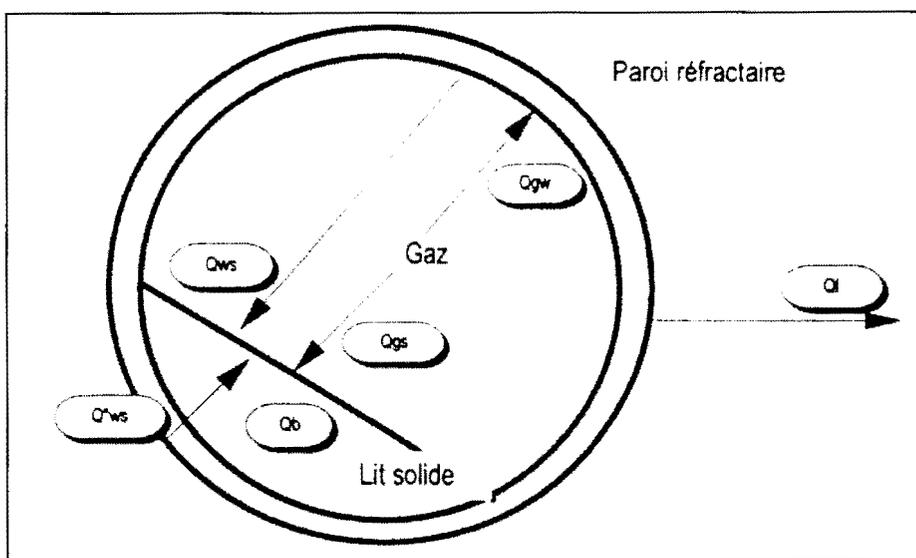


Figure 79 : Echanges d'énergie dans un four rotatif d'après KERDSUWAN.

Le taux de transfert de chaleur à travers le gaz, le lit solide et la paroi réfractaire peut être obtenu en faisant les hypothèses suivantes [24, 47]:

- Il existe un écoulement « piston » du gaz et du lit solide.
- Le flux de rayonnement dans la direction perpendiculaire d'écoulement du gaz est négligé par rapport au sens perpendiculaire.
- A chaque section d'écoulement, les températures sont caractérisées par une valeur unique.

Considérons une section longitudinale de la chambre de combustion et calculons :

A. Le taux de transfert de chaleur par le gaz vers la paroi réfractaire et le lit solide par unité de longueur du four.

$$\frac{q_{g \rightarrow w+s}}{L} = m'_g \frac{dT_g}{dx} \left(C_{pg} + T_g \frac{dC_{pg}}{dT_g} \right) \quad (5.4.1)$$

Où

$q_{g \rightarrow w+s}$: taux de transfert de chaleur du gaz (g) au lit solide (s) et à la paroi réfractaire (w). [W]

L : longueur du four [m]

m'_g : flux massique du gaz [kg/s]

T_g : température du gaz [K]

C_{pg} : chaleur spécifique du gaz [kJ/kg.K]

B. Le taux de transfert de chaleur par le gaz et la paroi réfractaire vers le lit solide par unité de longueur du four.

$$\frac{q_{g+w \rightarrow s}}{L} = m'_s \frac{dT_s}{dx} \left(C_{ps} + T_s \frac{dC_{ps}}{dT_s} \right) \quad (5.4.2)$$

$q_{g+w \rightarrow s}$: taux de transfert de chaleur du gaz (g) et la paroi réfractaire (w) vers le lit solide (s). [W]

m'_s : flux massique du solide [kg/s]

T_s : température du gaz [K]

C_{ps} : chaleur spécifique du lit solide [kJ/kg.K]

C. Energie dissipée vers l'extérieur

C'est la chaleur dissipée par conduction thermique et on peut l'obtenir par l'équation de Fourier

$$\phi = -k \cdot \text{grad}T \quad (5.4.3)$$

En intégrant entre le rayon interne r_i et le rayon externe r_e il vient :

$$\frac{q_l}{L} = \frac{2 \pi k_w}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} (T_e - T_i) \quad (5.4.4)$$

q_l :	chaleur dissipée vers l'extérieur	[W]
k_w :	conductivité thermique de la paroi réfractaire	[W/m.K]
T_i :	température de la paroi interne	[K]
T_e :	température de la paroi externe	[K]
r_i :	rayon de la paroi interne	[m]
r_e :	rayon de la paroi externe	[m]

D. Transfert convectif d'énergie

La convection du gaz avec une vitesse $V = (u_g + v_g)^{1/2}$ suggère que ce gaz a une énergie cinétique. Considérons la figure ci-dessous :

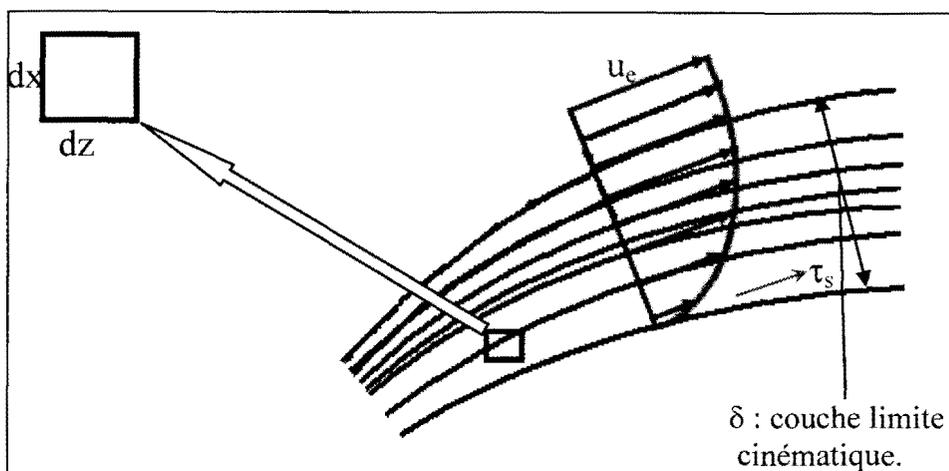


Figure 80: Convection d'un fluide le long d'une surface quelconque (inspiré de INCROPERA et DEWITT [62]).

Nous avons vu que la vitesse transversale du gaz est négligeable, de ce fait la vitesse de convection du gaz se réduit à sa composante le long de l'axe de convection : $V=u_g$. Nous allons donc nous limiter ici aux points de l'axe (Oz).

Soit ξ la chaleur (énergie) interne par unité de masse dans le volume de contrôle. L'énergie thermique contenue dans le volume de contrôle en un point d'abscisse $(z,0,0)$ est donc $(\rho u_g)\xi$. L'énergie cinétique y est $\frac{1}{2}(\rho u_g)V^2$ soit $\frac{1}{2}(\rho u_g)u_g^2$. Donc l'énergie due à la convection du gaz au point $(z,0,0)$ est :

$$E_{conv,z} = \rho u_g(\xi + \frac{1}{2} u_g^2) \tag{5.4.5}$$

En $z+dz$ elle vaut:

$$E_{conv,z} = \rho u_g(\xi + \frac{1}{2} u_g^2) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho u_g \left(\xi + \frac{u_g^2}{2} \right) \right] dz dx \tag{5.4.6}$$

La variation d'énergie du volume de contrôle par convection est donc :

$$- \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho u_g \left(\xi + \frac{u_g^2}{2} \right) \right] dz dx \tag{5.4.7}$$

D. Transfert d'énergie par rayonnement

Tous les corps matériels rayonnent, c'est-à-dire qu'ils échangent en permanence de l'énergie sous forme de « rayonnement électromagnétique ». Nous allons considérer le rayonnement sous son aspect corpusculaire (particules sans masse ni charge électrique, qu'on appelle « photons »). L'aspect ondulatoire relève de l'Electromagnétisme régie par les équations de Maxwell, qui ne seront pas abordées ici.

Le rayonnement est constitué de photons caractérisés par leur direction de propagation $\vec{\Omega}$ et par leur fréquence ν . Chaque photon se propageant dans un milieu d'indice de réfraction n transporte une énergie $E=h\nu$, h étant la constante de Planck qui vaut $6,62.10^{-34}$ J.s. Le photon est généralement caractérisé par sa longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = c / \nu$ plutôt que par sa fréquence ν . Avec $c = 3.10^8$ m.s⁻¹, la célérité de la lumière dans le vide. On distingue trois domaines spectraux principaux :

- le domaine ultra-violet ($0,1\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,4\mu\text{m}$)

- le domaine visible ($0,4\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,8\mu\text{m}$)
- le domaine infra-rouge ($0,8\mu\text{m} \leq \lambda \leq 50\mu\text{m}$)

L'échange d'énergie par rayonnement peut se faire par émission et absorption (annihilation) des photons. Le flux d'énergie transportée à travers une surface élémentaire dS , dans le cône d'angle solide $d\Omega$ centré autour de $\vec{\Omega}$, par les photons de toutes longueurs d'onde s'écrit : $d^4\Omega = L(\vec{P}, \vec{\Omega}) \cdot dS \cdot \cos\theta \cdot d\Omega$ avec $L(\vec{P}, \vec{\Omega})$ la luminance totale de la source.

Chaque corps rayonne suivant une loi qui lui est propre. Mais il existe un corps dont la luminance spectrale, déduite des lois de la physique statistique, est une fonction universelle de la fréquence et de la température. Ce système sert d'étalon pour l'étude du rayonnement. C'est le « corps noir ». A partir de la distribution statistique de Bose–Einstein, nous avons la démonstration à l'annexe n°4 de la loi de Planck qui donne le rayonnement du corps noir en fonction de la longueur d'onde :

$$R(\lambda, T) = \frac{8 \pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \tag{5.4.8}$$

Nous savons que le flux énergétique radiatif transporté à travers une surface élémentaire dS est donnée par :

$$d\Phi = L(\theta) \cdot dS \cdot d\Omega \cdot \cos\theta \tag{5.4.9}$$

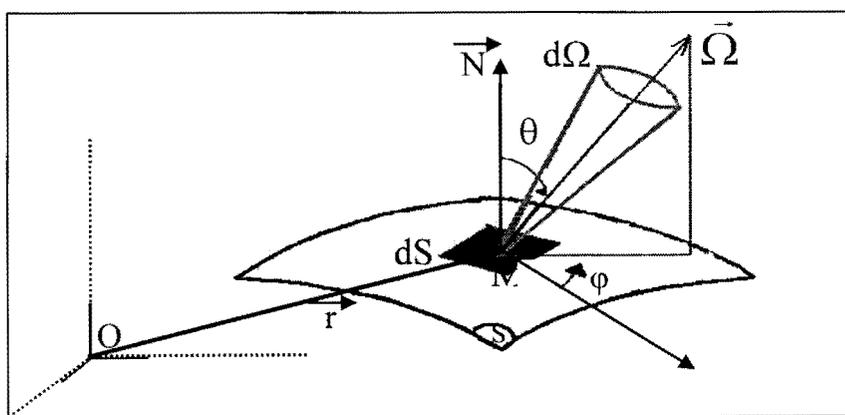


Figure 81: Rayonnement d'une source à partir d'un point.

avec θ , l'angle solide du cône centré autour de la surface élémentaire dS , $L(\theta)$ la luminance de la source et $d\Omega = 2\pi \cdot \sin\theta \cdot d\theta$

Or la luminance dépend de la fréquence et donc de la température du corps émetteur [63], nous pouvons écrire :

$$d\Phi(\nu, T) = L(\theta, \nu, T).dS.d\Omega.\cos\theta.d\nu \quad (5.4.10).$$

L'énergie rayonnée à travers une surface élémentaire $dS.\cos\theta$ donnée est donc:

$$d\Phi(\nu, T)d\nu dt = L(\theta, \nu, T).dS.d\Omega.\cos\theta.d\nu dt \quad (5.4.11)$$

Considérons la flamme rayonnante comme un cylindre. Le volume élémentaire est donc assimilable à un cylindre de hauteur $c.d\theta$ et de sommet ayant pour surface élémentaire $dS\cos\theta$, la densité d'énergie est alors donnée par

$$dU(\nu, T) = \frac{L(\theta, \nu, T)dS d\Omega \cos \theta d\nu dt}{cdS \cos \theta} = \frac{1}{c}L(\theta, \nu, T)d\Omega d\nu \quad (5.4.12)$$

Compte tenu de l'isotropie du corps noir à l'équilibre, nous avons :

$$dU(\nu, T) = \frac{4\pi}{c}L(\theta, \nu, T)d\nu \quad (5.4.13)$$

L'analyse dimensionnelle nous donne :

$$\frac{4\pi}{c}L(\theta, \nu, T)d\nu = R(\nu, T) \Rightarrow L(\nu, T) = \frac{c}{4\pi}R(\nu, T) \quad (5.4.14)$$

Considérons maintenant la **Puissance totale émise** par unité de surface (c'est-à-dire l'émittance) de la flamme :

$$dM(\nu, T) = L(\theta)d\Omega \cos \theta \quad (5.4.15)$$

En intégrant sur la demi surface d'une sphère à partir d'un point de la surface de l'émetteur :

$$M(\nu, T) = \int_0^{2\pi} L(\theta) \cos \theta (2\pi \sin \theta) d\theta \quad (5.4.16)$$

A cause de l'isotropie du rayonnement du corps noir, la luminance est indépendante de θ . En intégrant, nous trouvons :

$$M(\nu, T) = \pi L = \pi \frac{c}{4\pi} R(\nu, T) = \frac{c}{4} R(\nu, T) \quad [\text{J.m}^{-2}] \quad (5.4.17)$$

L'émittance totale est alors donnée par :

$$M(T) = \frac{c}{4} \int_0^{+\infty} R(\nu, T) d\nu = \frac{c}{4} \int_0^{+\infty} 8\pi \frac{h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1} d\nu = 2\pi \frac{h}{c^4} \int_0^{+\infty} \frac{\nu^3}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1} d\nu \quad (5.4.18)$$

Pour simplifier cette intégrale, posons $x = \frac{h\nu}{kT}$, il vient :

$$M(T) = 2\pi \frac{h}{c^4} (kT)^4 \frac{1}{h^4} \int_0^{+\infty} \frac{1}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi h}{c^4} \frac{(kT)^4}{h^4} \left(\frac{\pi^4}{15}\right) = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^4 h^3} T^4 \quad (5.4.19)$$

Soit :

$$M(T) = \sigma T^4 : \text{Loi de Stephan} \quad (5.4.20)$$

avec $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^4 h^3} = 5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ [W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$, la constante de Stephan.

D.1. Facteur de forme :

Considérons deux surfaces isotropes S_i et S_j rayonnant l'une vers l'autre (figure 82).

Soit ϕ_{ij} le flux total émis par S_i et reçu par S_j et $\phi_i = M_i S_i$ le flux total émis par S_i .

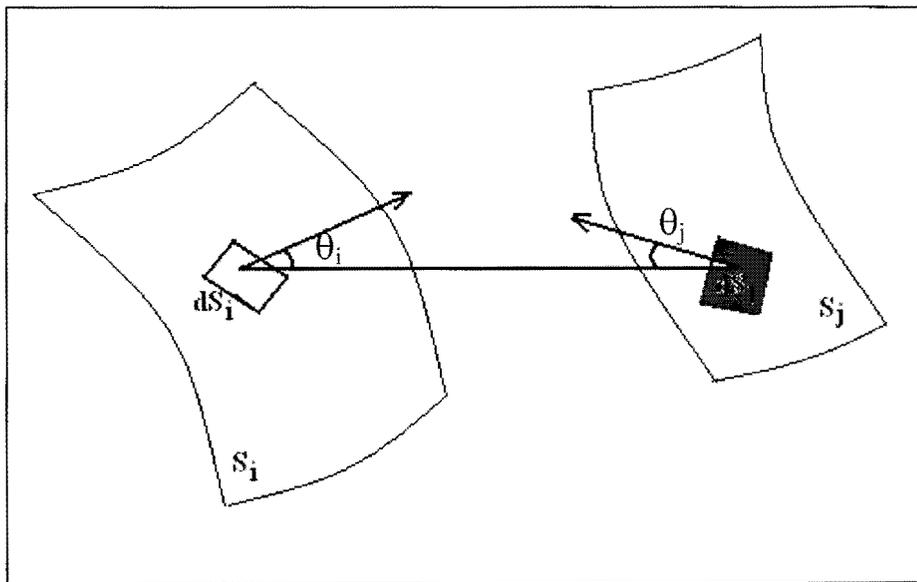


Figure 82: Deux surfaces isotropes séparées par un milieu semi-transparent [63].

On appelle facteur de forme de S_i vers S_j , le rapport : $F_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\phi_i}$

Ainsi $0 \leq F_{ij} \leq 1$. F_{ij} représente la fraction du flux émis par la surface S_i tombant directement sur la surface S_j .

Le corps noir que nous avons étudié précédemment est un cas idéal. Dans la pratique, les systèmes étudiés sont des corps gris (une approximation du corps noir). Le facteur de forme à considérer pour le four rotatif c'est son facteur de forme gris, traduit par son émissivité. Le flux net de chaleur échangée de la flamme rayonnante vers la surface réfractaire de la chambre de combustion est égal à (cf. annexe n° 5) :

$$\phi_{fr} = \varepsilon_f S_{fr} \sigma (T_f^4 - T_r^4) \quad (5.4.21)$$

De même le flux net échangé entre la flamme rayonnante et le lit solide est :

$$\phi_{fs} = \varepsilon_f S_{fs} \sigma (T_f^4 - T_s^4) \quad (5.4.22)$$

Avec :

ε_f : émissivité de la flamme [0..1]

S_{fr} : surface de la flamme exposée au réfractaire [m²]

S_{fs} : surface de la flamme exposée au lit solide [m²]

σ : constante de Stephan

T_f : température de la flamme [K]

T_r : température du réfractaire exposé [K]

T_s : température du lit solide exposé [K]

E. Bilan global des échanges d'énergies dans la chambre de combustion.

Le mouvement du gaz dans la chambre de combustion est une convection forcée. Les gaz chauds issus du brûleur d'appoint pénètrent dans la chambre de combustion avec une vitesse assez grande. Pour déterminer cette chaleur, nous avons déjà cherché les ordres de grandeur de vitesse du lit et du gaz pour voir quelles hypothèses faire. Nous avons vu que la vitesse du gaz, d'un ordre de grandeur de 10³ plus élevé que celui de déplacement des déchets, autorisait de considérer ces derniers comme immobiles.

Le carton (papier), le bois et le plastique que nous avons utilisé dans notre déchet modèle, sont des combustibles spécifiques, riches en matières volatiles.

Le phénomène le plus important dans la combustion d'un combustible riche en matières volatiles et pauvre en carbone fixe, est la combustion des produits issus de la

dégradation thermique à l'interface gaz – solide. Notre système de combustion se compose de combustibles poreux où le gaz réactif traverse les interstices du solide. La réaction exothermique dépend fondamentalement de la réaction entre l'oxygène et la matière volatile issue de la dégradation oxydante.

L'étude du transfert convectif de chaleur est faite en posant les hypothèses suivantes [29, 47] :

- Le volume de contrôle est parfaitement agité, la différence de température entre le gaz et le lit solide en contact est négligeable. L'étude se fera donc en considérant le système comme constitué, d'un gaz d'une part et d'un solide d'autre part, en contact et ayant la même température.
- La déperdition de l'énergie par viscosité et le travail des forces extérieures sont négligeables. De plus on suppose que la paroi horizontale de la chambre de combustion est isotherme.

Soient u_{g0} , ρ_{g0} et T_0 , la vitesse, la masse volumique et la température du gaz à sa sortie du brûleur primaire ; u_g , ρ_g , C_{pg} et T , la vitesse, la masse volumique, la chaleur massique à pression constante et la température du gaz dans le réacteur (figure 83). Soient v_s , ρ_s et T la vitesse, la masse volumique et la température du lit solide dans le réacteur. Nous avons déjà vu que dans le cas de la combustion des déchets dans le four rotatif, $u_g \gg v_s$, le solide est considéré comme immobile. L'énergie de convection du lit solide est donc pratiquement nulle. Celle du gaz est égale à : $u_g \rho_g C_{pg} T$ en un point du réacteur d'abscisse z . Dans le cas d'une réaction d'oxydation, l'énergie est produite par la combustion du déchet. Une partie de cette énergie est rayonnée vers les parois du four, une autre est perdue vers l'extérieur par conduction. Le terme de rayonnement est négligeable devant celui de la convection du gaz et de la conduction [24, 47-48, 62]. L'énergie de conduction du lit solide vaut: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$ avec λ la conductivité du lit

solide. Pour prendre en compte le rayonnement, on prend la conductivité effective au lieu de celle du gaz seul:
$$\lambda_e = \lambda + \lambda_{ray} \quad (5.4.23)$$

Au point d'abscisse z , l'énergie dans le réacteur est donc égale à :

$$\rho_g u_g C_{pg} T - \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \tag{5.4.24}$$

Au point d'abscisse $z + \Delta z$, elle est égale à :

$$\rho_g u_g C_{pg} T + \frac{\partial(\rho_g u_g C_{pg} T)}{\partial z} \Delta z - \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z \tag{5.4.25}$$

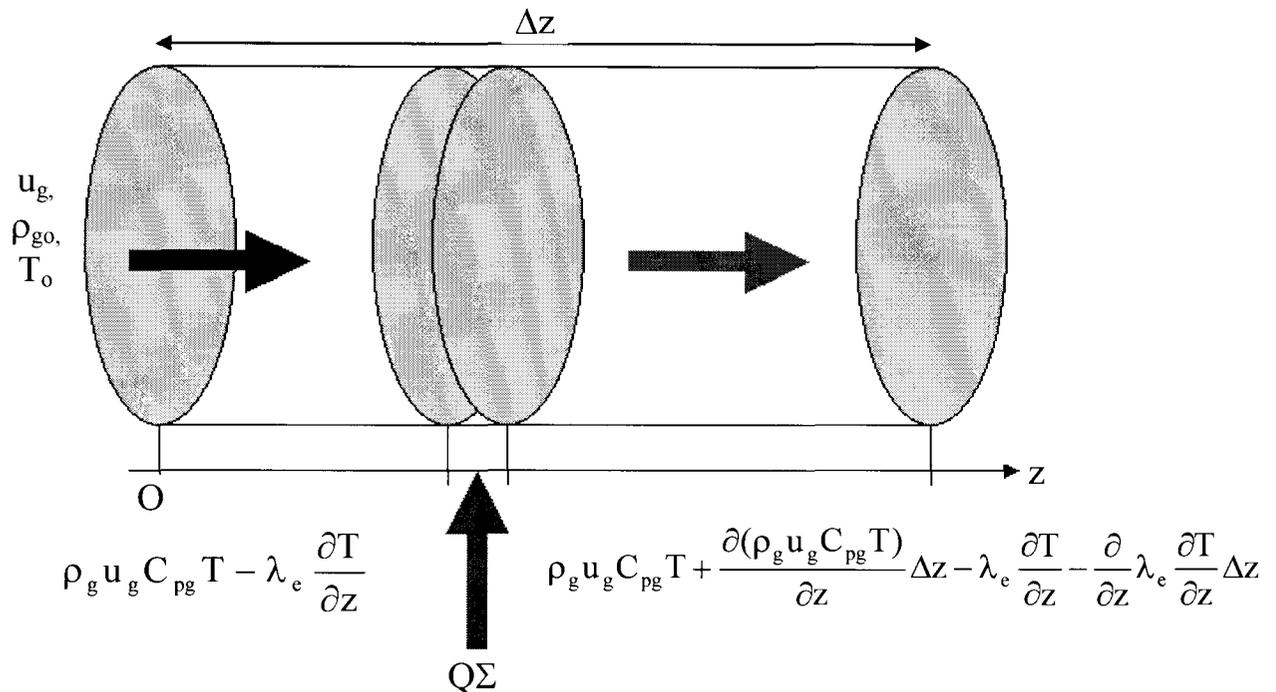


Figure 83 : Bilan énergétique dans un réacteur.

En régime stationnaire et dans un réacteur de petit volume, les hypothèses faites précédemment supposent que la réaction est indépendante du temps et de la position. L'équation de la conservation de l'énergie dans le réacteur s'écrit :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho_s C_{ps} T)}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\frac{\partial(C_{pg} \rho_g u_g T)}{\partial z}}_{(2)} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z}}_{(3)} + \underbrace{Q\Sigma}_{(4)} \tag{5.4.26}$$

Le terme (1) représente le taux d'accumulation d'énergie dans le réacteur, le terme (2) est l'énergie transporté par la convection forcée du gaz, le troisième terme (3) est le flux d'énergie par conduction et rayonnement, enfin le dernier terme (4) représente la

production de chaleur couplée à la réaction chimique. Le taux de production de l'énergie est donné par [67] :

$$\Sigma = -\frac{dC}{dt} \propto \frac{[O_2]^m}{\frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_c}} \quad (5.4.27)$$

Dans l'équation (5.4.26), λ_e représente la conductivité effective qui inclut la conductivité du lit solide et le rayonnement [68].

$\lambda_e = \lambda + \lambda_{\text{ray}}$ avec $\lambda = \phi\lambda_a + (1 - \phi)\lambda_s$ (5.4.27.a), ϕ étant le flux du rayonnement dans le réacteur, λ_{ray} étant donné par [69] : $\lambda_{\text{ray}} = \frac{16k_B d_c}{3} T^3$ (5.4.27.b).

En supposant que les propriétés thermodynamiques des combustibles sont constants avant la réaction chimique, le terme (1) peut être développé comme suit :

$$\frac{\partial(\rho_s C_{ps} T)}{\partial t} = C_{ps} T \Sigma + \rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.4.28)$$

Dans l'équation (5.4.26), le terme $\rho_g u_g$ est la vitesse massique de l'écoulement exprimée en kg/m².s.

$$\rho_g u_g = \rho_0 u_{g0} + \int_0^z \Sigma dz \quad (5.4.29)$$

Dans le second membre de l'équation ci-dessus, le premier terme est le flux massique initial par convection et le deuxième le flux massique issu de la réaction de combustion (transformation solide – gaz). Donc le deuxième terme de l'équation (5.4.28) peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\partial(\rho_s C_{ps} T)}{\partial z} = C_g \rho_g u_g \frac{\partial T}{\partial z} + C_{ps} T \Sigma \quad (5.4.30)$$

En supposant que $C_{ps} T$ et $C_{pg} T$ sont faibles comparés à Q et les termes de dispersion thermique, l'équation (5.4.26) se met finalement sous la forme :

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} + C_{pg} \rho_g u_g \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} + Q \Sigma \quad (5.4.31)$$

Ce résultat est obtenu en négligeant les termes $C_{ps}T\Sigma$ et $C_{pg}T\Sigma$ qui représentent la chaleur sensible du combustible et celle de la fumée traversant le lit solide. Ces deux énergies sont négligeables comparées à la production et au transfert de chaleur par convection et conduction. Le terme de convection est très rarement pris en compte dans la plupart des études sur l'inflammation et la combustion de solide autoentretenue dans un milieu poreux [69-70].

5.5. Combustion avec le modèle CSTR [28, 29] appliqué au déchet.

Dans ce qui suit, nous avons appliqué le modèle CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor) au four rotatif pour l'étude de l'inflammation. La chambre de combustion est ainsi divisée en trois (03) volumes de contrôles correspondant aux différentes zones dans le four. Dans chaque CSTR nous admettons que:

- le gaz et le solide sont parfaitement agités et la température est la même à l'interface gaz-lit solide.
- la température d'entrée du réacteur suivant dans l'axe du cylindre est égale à celle de sortie du réacteur précédent au même point.

5.5.1. Zone d'entrée :

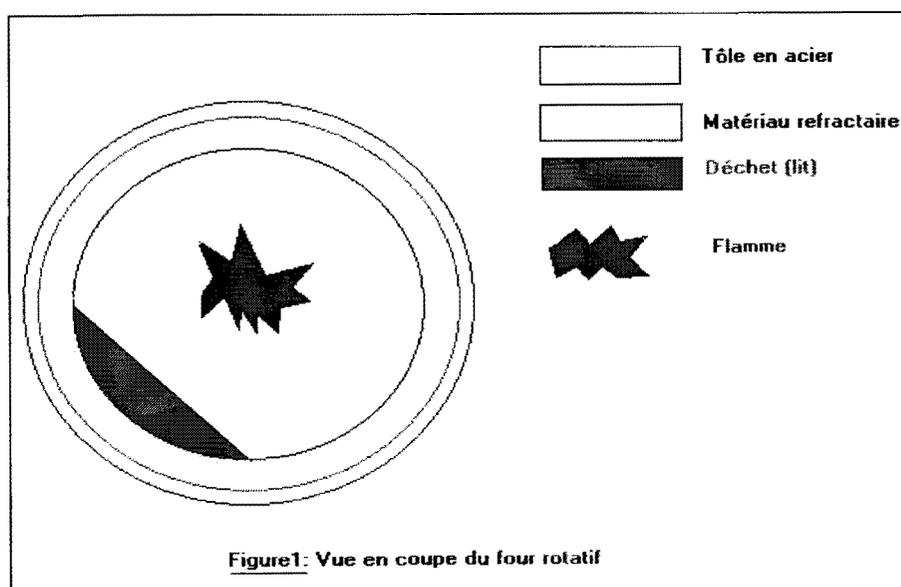


Figure 84 : Coupe transversale de la zone d'entrée dans le four rotatif.

Dans cette zone, le déchet peut encore comporter de l'humidité. C'est une zone avec flamme. Il y aura d'abord séchage du déchet. Les travaux de CHEN et al. [73-74] ont montré que l'évaporation de l'eau se fait en deux phases I et II. Dans la première phase la proportion de vapeur est inférieure à la constante $\vartheta_{I,II}$ et dans la deuxième phase, elle lui est supérieure :

$$\frac{d\vartheta_{H_2O}}{dt} = -v_1 \quad \text{dans un premier temps, quand } \vartheta_{H_2O} < \vartheta_{I,II} \quad (5-4-1)$$

$$\frac{d\vartheta_{H_2O}}{dt} = -k_e \vartheta_{H_2O} \quad \text{ensuite, quand } \vartheta_{H_2O} > \vartheta_{I,II} \quad (5-4-2)$$

$\vartheta_{I,II}$ est une constante spécifique à chaque solide qu'on détermine empiriquement.

5.5.2. Zone de combustion

Dans cette zone qui comporte aussi une flamme le déchet s'enflamme suivant les étapes suivantes :

- Transfert de chaleur.
- Transfert de masse.
- Dégradation oxydante.
- Réaction homogène.
- Développement des ondes d'inflammation.
- Réaction hétérogène entre les gaz et la phase condensée.

Nous allons étudier une zone finie du front d'inflammation en supposant qu'il n'y a pas de gradient de température, c'est-à-dire que la zone est très fine. L'étude se fera donc par la méthode de SEMENOV. Cette théorie utilise l'approche stationnaire pour analyser les processus non stationnaires comme l'inflammation. Une combustion est dite stationnaire si la dérivée de la température par rapport au temps est nulle :

$$\frac{dT}{dt} = 0.$$

Etudions une réaction exothermique dans un CSTR d'épaisseur caractéristique $\delta = \frac{\lambda_e}{C_{pg0} u_{go} \rho_{go}}$. La production de chaleur dans le CSTR est représentée par Q^+ et la perte de chaleur par Q^- . La variation de chaleur potentielle contenue dans

le CSTR est $\frac{d(\rho_s C_{ps} T)}{dt}$. L'accumulation de chaleur dans le CSTR s'écrit donc :

$$\frac{d(\rho_s C_{ps} T)}{dt} = Q^+ - Q^-$$

Soit dans le cas stationnaire, $Q^+ = Q^-$

Les figures ci-dessous représentent l'évolution de Q^+ et Q^- en fonction de la température :

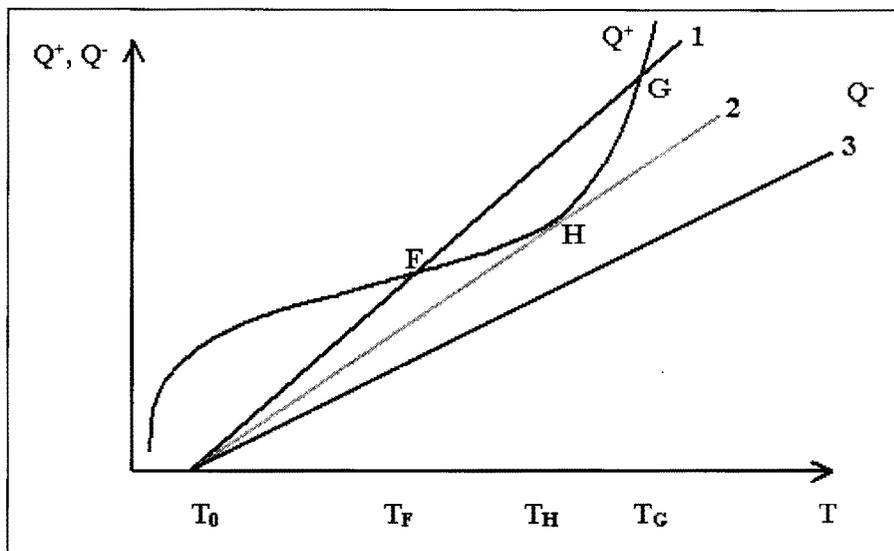


Figure 85.: Evolution de Q^+ et Q^- en fonction de la température et pour des taux de perte chaleur différents.

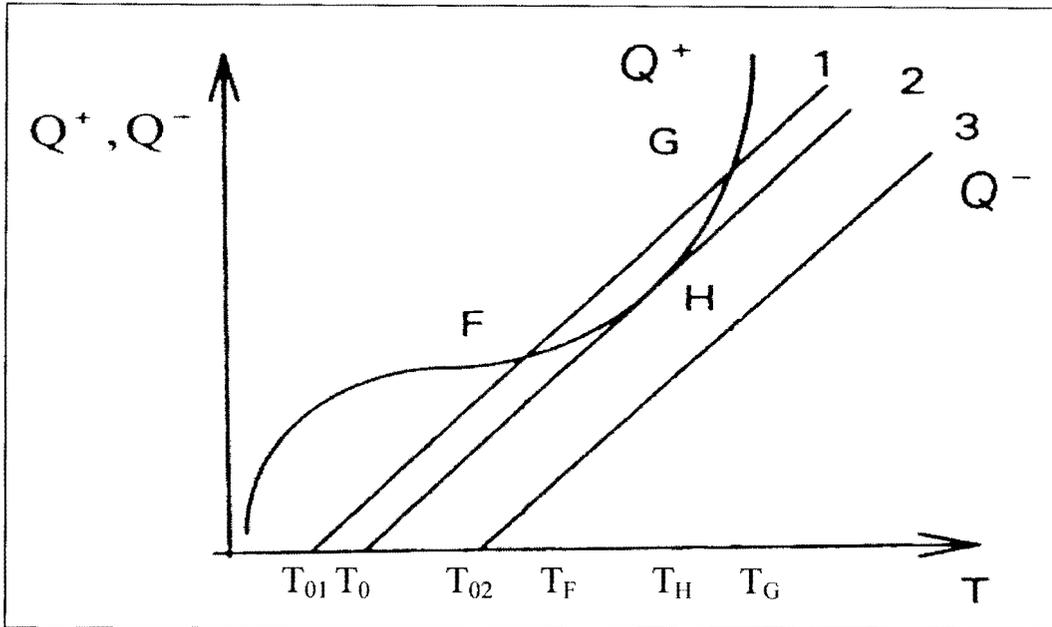


Figure 86 : Q^+ et Q^- en fonction des différentes températures initiales $T_{02} > T_0 > T_{01}$.

Dans le premier cas, les courbes 1, 2 et 3 ont des coefficients de perte de chaleur différents et une même température initiale T_0 . Dans le second cas, ces coefficients de perte de chaleur sont identiques et les températures initiales différentes.

Q^+ évolue exponentiellement suivant l'augmentation de la vitesse de réaction sous une forme d'Arrhenius, et Q^- dépend linéairement de la température. Lorsque $T > T_G$ sur la courbe 1, $T > T_H$ sur la courbe 2 et quelque soit la température sur la courbe 3, le déséquilibre thermique produit une accumulation de chaleur et provoque l'accélération de la réaction chimique vers un état non stationnaire, c'est alors l'inflammation du déchet. Le point F est un point stationnaire où $Q^+ = Q^-$. Quand la température est peu supérieure à T_F (courbe 1), la perte de chaleur est supérieure à celle de la production et la température retombe à T_F . Quand au point H, il s'agit d'un point intermédiaire. Quand $T < T_H$ (courbe 2), l'accumulation de chaleur déplace la réaction vers ce point pour atteindre un état d'équilibre thermique.

La figure 87 représente l'évolution de la température en fonction du temps. Pour une température initiale T_{01} , la réaction peut atteindre le point F défini précédemment (figure 69) en régime stationnaire avec un plateau de température T_F (figure 87, courbe 1). La courbe 2 présente un équilibre thermique au point limite d'inflammation ; cet équilibre se produit jusqu'à disparition complète du combustible. Quand la

température initiale est légèrement supérieure T_0 l'inflammation apparaît (figure 86, courbe 3'). Lorsque la température est encore plus importante ($T_{02} > T_0$), une augmentation rapide de la température peut se produire (figures 86 et 87, courbe 3). Le point d'inflexion correspond au point d'inflammation.

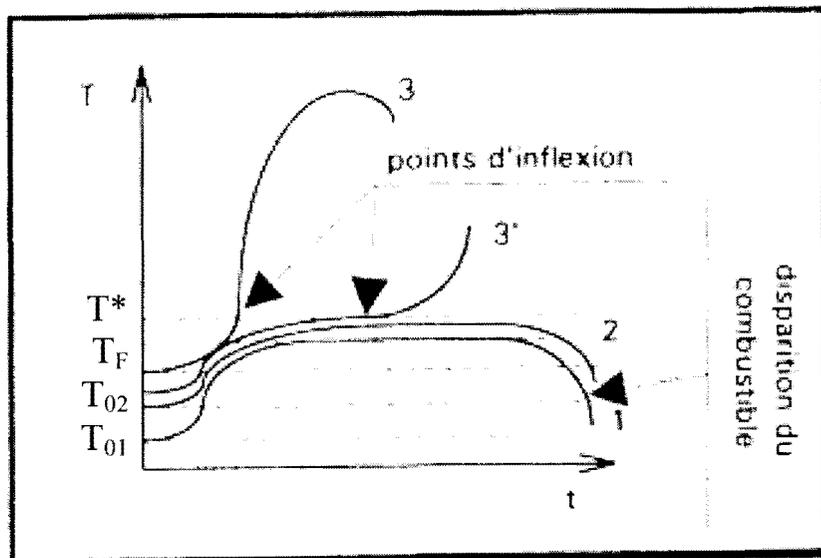


Figure 87: Evolution de la température dans le réacteur en fonction du temps.

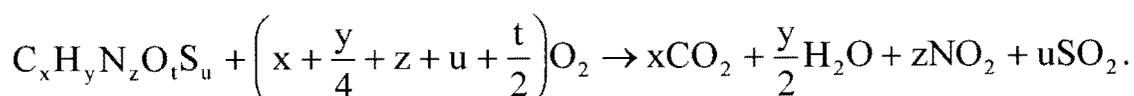
On remarque que la théorie de SEMENOV prend en compte deux hypothèses importantes :

La température dépend de la vitesse de réaction.

L'énergie dégagée par la réaction peut entretenir la réaction elle-même.

5.6. Modèle chimique

Lors d'une combustion stœchiométrique, on suppose que tout le carbone, azote et soufre présents dans le déchet se transforment en dioxydes de carbone, d'azote et de soufre respectivement. En désignant par x , y , z , t et u cinq nombres positifs, la combustion d'un tel déchet se fera donc suivant une réaction du type :



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

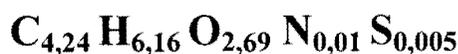
Notre travail vient à la suite de celui de ZHOU (1994), ROGAUME T (2001) qui ont travaillé sur un réacteur à lit fixe et KERDSUWAN (1994) qui a travaillé sur un four rotatif. Ils s'étaient intéressés aux facteurs d'émission des gaz polluants au cours de la combustion soit du papier, du carton et le plastique seul, soit des mélanges de ces derniers.

Notre intérêt s'est surtout porté sur l'effet de la vitesse de rotation, de la charge et de l'excès d'air sur les émissions polluantes. Les résultats saillants sont que :

- les émissions de NO croissent avec la charge, l'excès d'air et la température jusqu'à 1000°C.
- Tous les paramètres, notamment la température et les émissions gazeuses ont un minimum autour d'une vitesse de rotation de 0.76 tour par minute.
- Certains paramètres à vide peuvent être déduits des modèles avec une précision relative de 20%. Cette précision doit être améliorée. Pour ce faire une connaissance plus précise de la constitution chimique du fioul utilisé ainsi que celle du déchet modèle sont nécessaires.

Nous avons en plus proposé un modèle de la fraction combustible du déchet ménager de la ville de Ouagadougou.

La formule brute approchée du modèle de la fraction combustible du déchet ménager de Ouagadougou est



Nous avons connu quelques limitations au niveau des moyens expérimentaux mis à notre disposition, ce qui ne nous a pas permis d'étudier tous les paramètres souhaités. C'est le cas du débit du brûleur de la chambre de combustion primaire qui n'a pu être modifié par manque de tête de combustion (gicleur) de remplacement approprié. Nous n'avons pas aussi pu déterminer le débit de l'excès d'air en continu, nous contentant d'une estimation de l'ouverture du robinet (0, 1/4 et 1/3) de son ouverture.

ANNEXES

Annexe n°1 : quelques considérations de coût du traitement des déchets.

Les coûts de traitement des déchets sont très variables. Cette annexe résume une étude intitulée « Analyse des coûts de gestion des déchets municipaux » réalisée par la SOFRES(*) pour le compte de l'Agence pour l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Association de Maires de France (AMF).

	Pourcentage du(des)...sur le coût total(%)			
	Investissements	Fonctionnement	Gestion des sous-produits	Frais du personnel
Incinération	42,5 ± 22,5	25 ± 5	17,5 ± 2,5	10
Stockage en CET	77,5 ± 2,5	Non déterminé	Non déterminé	Non déterminé
Compostage	35 ± 5	40 ± 10	25	7,5 ± 2,5

	Coût moyen (†) par taille des installations (F / t)		
	Petites	Moyennes	Grandes
Incinération	825 ± 75	600 ± 100	475 ± 25
Stockage en CET	> 400	-----	< 300
Compostage	450 (‡)	-----	300 (§)

* SOFRES CONSEIL 16, rue Barbes 92129 Montrouge Cedex (France) Tél : 33 1 40 92 40 92 Fax : 33 1 42 53 91 16

† L'enquête de la SOFRES donnait les résultats sous la forme X à Y ; nous donnons les résultats sous la forme $C = C_m \pm \Delta C$, avec $C_m = \frac{1}{2} (X + Y)$ et $\Delta C = |C_m - X| = |C_m - Y|$.

‡ Installations de l'ordre de 6 000 t/an.

§ Installations de l'ordre de 15 000 t/an et plus.

Annexe n°2 : Fonctionnement de l'analyseur de gaz Testotherm

Les gaz issus de la dégradation des composés solides sont analysés en continu au moyen d'un Testotherm 350.

Il mesure de façon réelle le CO, NO, NO₂, SO₂, et O₂ mais calcule en fonction de l'oxygène et du type de combustible les taux de CO₂.

Les mesures sont effectuées grâce à des cellules électrochimiques. Elles se distinguent par leur nombre d'électrodes : la cellule de mesure de la concentration en dioxygène en comprend deux, alors que les autres (CO, NO, SO₂...) en comprennent trois.

La cellule 'O₂' :

Le schéma de principe de ce capteur est décrit ci-dessous :

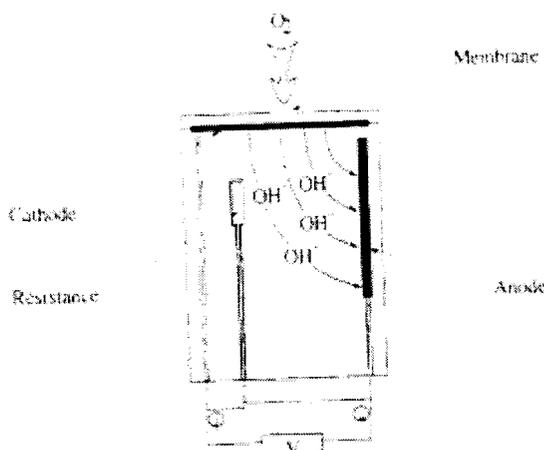
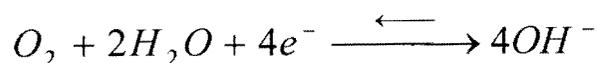
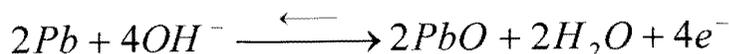


Schéma de principe de la cellule O₂.

Les gaz de combustion traversent une membrane puis arrivent sur la cathode où le dioxygène est soumis à une réduction suivant la réaction :



Les ions hydroxydes migrent à travers l'électrolyte alcalin vers l'anode de plomb, siège de la réaction :



Le courant produit passe à travers une résistance aux bornes de laquelle la tension est mesurée. La valeur de ainsi obtenue est donc proportionnelle à la pression partielle de dioxygène dans les fumées.

Les cellules 'gaz toxiques' :

Les cellules sont conçues selon le schéma suivant :

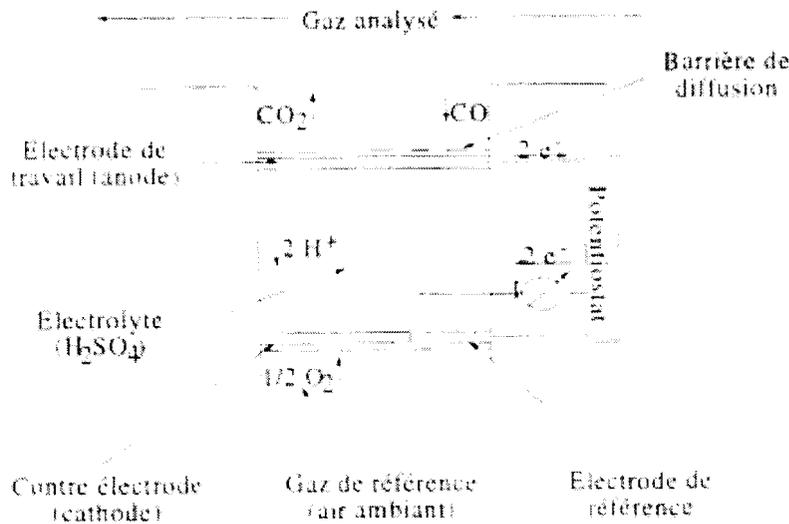
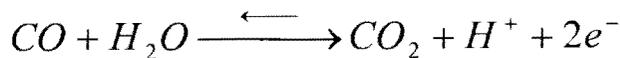
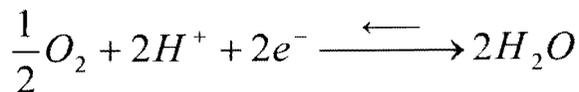


Schéma de principe d'une cellule à polluant (cellule CO).

Après avoir traversé la membrane, le gaz à analyser est oxydé sur l'électrode de travail. Dans le cas du CO par exemple, la réaction d'oxydation est la suivante :



La cathode est le siège de la réaction :

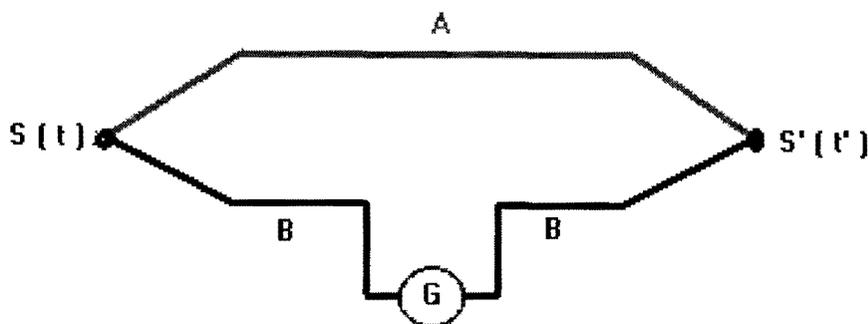


Le potentiostat permet de maintenir une différence de potentiel, en fonction du gaz à analyser, entre l'électrode de travail et l'électrode de référence ; la lecture du courant dans le circuit interne conduit à la valeur de la pression partielle du polluant analysé.

Annexe n°3 : Principe des thermocouples.

Effet thermoélectrique

Si l'on considère deux soudures métalliques A et B de deux métaux différents à des températures t et t' différentes, il apparaît dans le circuit une f.e.m qu'on peut mesurer en insérant un galvanomètre dans le circuit.



On peut simplifier le circuit en laissant la deuxième soudure à température ambiante. On mesurera donc directement la f.e.m. du circuit par laquelle on remonte à la température. Les différents types de thermocouples ainsi que leurs étendues de mesures sont présentés sur la figure ci-dessous :

Thermo-couple	Conducteur +	Conducteur -	Plage de température
K	Nickel –Chrome 10%	Nickel-Aluminium 5%-Silicium	0 / +1100°C
V	Cuivre	Cuivre –Nickel	0 / +1100°C
T	Cuivre	Cuivre –Nickel –Constantan	-185 / + 300°C
U	Cuivre	Constantan	-185 / +300°C
J	Fer	Cuivre –Nickel –Constantan	+20 / +700°C
E	Nickel –Chrome 10%	Cuivre –Nickel –Constantan	0 / +800°C
N	Nicrosil (*)	Nisil (**)	0 / +1100°C
R	Platine –rhodié 13%	Platine	0 / +1600°C
S	Platine –Rhodié 10%	Platine	0 / +1550 °C
B	Platine –Rhodié 30%	Platine –Rhodié 6%	+100 / +1600°C
W	Tungstene	Tungstene –Rhenium 26%	+20 / +2300°C

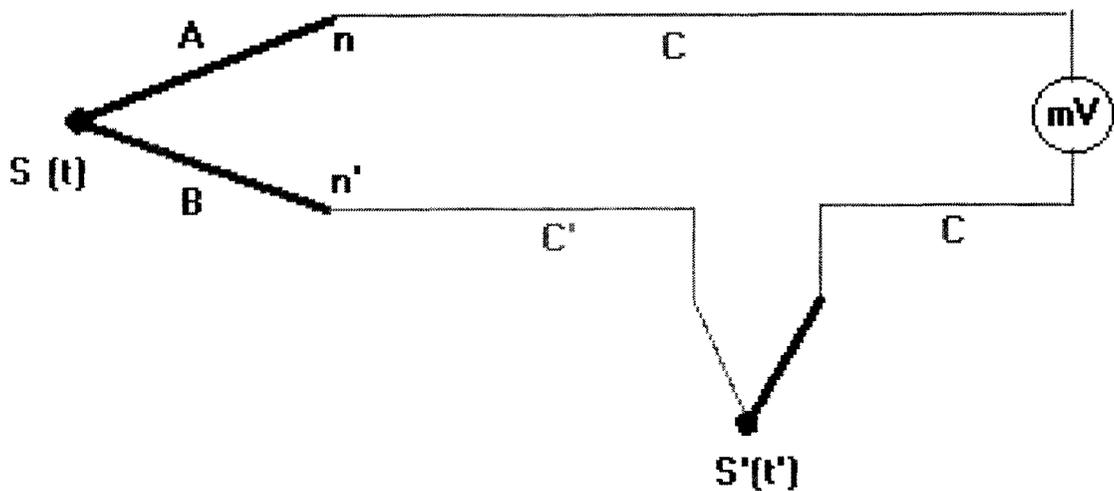
(*) Nicrosil = Nickel 84.4% - Chrome 14.2% - Silicium 1.4% (**) Nisil = Nickel 95.6% - Silicium 4.4 %
Gaines de protection des thermocouples

Nature	Composition	T° maximale d'utilisation	Emploi types	Remarques
Fonte	3.4 C + 1.5 Si + 0.5 P + 0.5 Mn + 94 Fe	500 °C	Alcalis ou Zn fondu	Minces, sont perméables aux gaz. Déformation à $t > 400^{\circ}\text{C}$
Cu	Cu	500 °C	Vapeur d'eau	Corrosion dans la vapeur d'eau si température supérieure à 500 °C
Bronze	90 Cu + 10 Sn	500 °C	Industries chimiques	
Monel	70 Ni + 30 Cu	500 °C	Industries chimiques	
Acier doux	0.2 à 0.3 C + 99.5 Fe	600 °C	Zn et Pb fondus	Sensible à S et O ₂
Nickel	Ni	1100 °C	Bains de cyanures alcalins	Sensible à S, C et à l'oxydation.
Acier inox	0.1 C + 15 à 30 Cr + 70 à 85 Fe	1100 °C	Gaz oxydants, réducteurs ou sulfuriques	Inoxydable dans les compositions indiquées.
Chrome – Nickel	50 à 75 Ni + 1 à 2 Cr + 1 à 4 Mn + 1 à 20 Fe	1100 à 1200 °C	Bains de trempe et de sel chaud. Fours de calcination	Sensible à S et aux réducteurs. Haute résistance à la température.
Quartz fondu	----	1100 °C	Gaz, métaux fondus jusqu'à 1500 °C	Se dévittrifie à la longue pour $t > 1000^{\circ}\text{C}$, devient perméable aux gaz. Attaqué vers 600 °C par les alcalis fondus et Fe ₂ O ₃ (800 °C)
Porcelaine pure	Kaolin + Feldspath 26% Al ₂ O ₃ vernisé ou non	1200 °C	Mesures continues sans choc	Résiste mal aux variations de température. Attaqué à haute température par Fe, amiante, alcalis fondus et oxydes métalliques.
Carborundum	SiC	1200 °C	Verre fondu, scories, feu.	S'oxyde vers 1200 °C. Sensible à la longue aux métaux et oxydes, alcalis et chlore.
Terre réfractaire	43 Al ₂ O ₃ + 52 SiO ₂ + 2.5 Fe ₂ O ₃	1400 °C	Enveloppes anti chocs pour gaines goûteuses	Poreuse.
Sillimanite	10 a H % Al ₂ O ₃ 57 – 72 % SiO ₂ 42 - 27	1600 °C	Gaz et divers. Température assez régulière	10 a – imperméable aux gaz jusqu'à 1580 °C H – perméable, mais résiste mieux à haute température.
Coridon fritté	9.98 Al ₂ O ₃ + 0.2 Fe ₂ O ₃ + SiO ₂	1700 °C	Même avec variation de température	Imperméable jusqu'à 1700 °C
Graphite	C	1700 °C	Acier fondu et divers	Donne une atmosphère réductrice autour du

				couple
Magnésie	MgO	1950 °C		Résiste mal aux variations de température.
Spinelle	Al ₂ O ₃ +MgO			
Zircone	ZrO ₂	2000 °C		Résiste bien aux variations de température.

Montage de thermocouples.

- Le montage seul : Le thermocouple va jusqu'à l'instrument de mesure où se fait la correction de la soudure froide.
- Montage avec câble d'extension : les prolongations sont faites avec des fils de même nature que ceux qui constituent les thermocouples.
- Montage avec câble de compensation. Les fils de prolongement sont de nature différents de celles du thermocouple mais ont des propriétés électriques équivalents dans une plage de température réduite 10 °C au maximum).



Annexe n°4 : Le programme d'acquisition du four rotatif avec Testpoint.

Panel1

TestPoint v3.4, file=C:\TESTPT\serie2Eng.TST

Page 3

20:51 Sat. Sep. 06,2003



Thermocouples(cliquer pour démarrer)

(\Panel1\Thermocouples(cliquer pour

Action list for Pushbutton object "Thermocouples(cliquer pour démarrer)":

- | | | | |
|-----|---------------|--------------------|---|
| 1) | Set mode of | RS232 1 | baud rate=4800, parity=none, bits=8, stop bits=1 |
| 2) | Linear series | Loop1 | from 1 to 100000, step by 1 |
| 3) | Open | Fichier Résultats | |
| 4) | Store in | instant | from Loop1 |
| 5) | Start | date | interval=1 |
| 6) | Set | Date de la manipul | to date |
| 7) | Start | Durée | interval=1 |
| 8) | Set | Instant de mesure | to Durée |
| 9) | Sample A/D | A/D1 | once, channel(s)=1 |
| 10) | Set | Temp gaz entrée | to A/D1 |
| 11) | Append to | temp1 | from A/D1 |
| 12) | Sample A/D | A/D2 | once, channel(s)=2 |
| 13) | Store in | temp2 | from A/D2 |
| 14) | Set | temper2 | to A/D2 |
| 15) | Sample A/D | A/D3 | once, channel(s)=3 |
| 16) | Store in | temp3 | from A/D3 |
| 17) | Set | temp3(lit solide) | to A/D3 |
| 18) | Sample A/D | A/D4 | once, channel(s)=4 |
| 19) | Set | temper4 | to A/D4 |
| 20) | Store in | temp4 | from A/D4 |
| 21) | Sample A/D | A/D5 | once, channel(s)=5 |
| 22) | Set | temp5(sortie four) | to A/D5 |
| 23) | Store in | temp5 | from A/D5 |
| 24) | Sample A/D | A/D6 | once, channel(s)=6 |
| 25) | Set | temp6 | to A/D6 |
| 26) | Store in | temper6 | from A/D6 |
| 27) | Sample A/D | A/D7 | once, channel(s)=7 |
| 28) | Set | temp7(sortie gaz) | to A/D7 |
| 29) | Store in | temp7 | from A/D7 |
| 30) | Sample A/D | A/D8 | once, channel(s)=8 |
| 31) | Store in | temp8 | from A/D8 |
| 32) | Set | temp8(Post combust | to A/D8 |
| 33) | Open | RS232 1 | |
| 34) | Output to | RS232 1 | with 18 , 194 , 145 , 4, term.=____, wait for completion?=1 |
| 35) | Enter from | RS232 1 | up to 7 bytes, stop on EOS=____ |
| 36) | Enter from | RS232 1 | up to 4 bytes, stop on EOS=____ |
| 37) | Store in | O2 | from RS232 1 |
| 38) | Set | O2 (%) | to O2 |
| 39) | Output to | RS232 1 | with 18 , 194 , 145 , 2, term.=____, wait for completion?=1 |
| 40) | Enter from | RS232 1 | up to 7 bytes, stop on EOS=____ |
| 41) | Enter from | RS232 1 | up to 4 bytes, stop on EOS=____ |
| 42) | Store in | CO | from RS232 1 |
| 43) | Set | CO(ppm) | to CO |
| 44) | Output to | RS232 1 | with 18 , 194 , 145 , 0, term.=____, wait for completion?=1 |
| 45) | Enter from | RS232 1 | up to 7 bytes, stop on EOS=____ |
| 46) | Enter from | RS232 1 | up to 4 bytes, stop on EOS=____ |
| 47) | Store in | NO | from RS232 1 |
| 48) | Set | NO(ppm) | to NO |
| 49) | Output to | RS232 1 | with 18 , 194 , 145 , 3, term.=____, wait for completion?=1 |
| 50) | Enter from | RS232 1 | up to 7 bytes, stop on EOS=____ |
| 51) | Enter from | RS232 1 | up to 4 bytes, stop on EOS=____ |
| 52) | Store in | NO2 | from RS232 1 |

Panel1

TestPoint v3.4, file=C:\TESTPT\serie2Eng.TST

Page 4

20:51 Sat. Sep. 06,2003

Action list for Pushbutton object "Thermocouples(cliquer pour démarrer)": ...continue

- 53) Set NO2(ppm) to NO2
- 54) Output to RS232 1 with 18 , 194 , 145 , 1, term.= ____, wait for completion?=1
- 55) Enter from RS232 1 up to 7 bytes, stop on EOS= __
- 56) Enter from RS232 1 up to 4 bytes, stop on EOS= __
- 57) Store in SO2 from RS232 1
- 58) Set SO2(ppm) to SO2
- 59) Output to RS232 1 with 18 , 194 , 145 , 13, term.= ____, wait for completion?=1
- 60) Enter from RS232 1 up to 7 bytes, stop on EOS= __
- 61) Enter from RS232 1 up to 4 bytes, stop on EOS= __
- 62) Store in CO2 from RS232 1
- 63) Set CO2(%) to CO2
- 64) Output to RS232 1 with 18 , 194 , 145 , 9, term.= ____, wait for completion?=1
- 65) Enter from RS232 1 up to 7 bytes, stop on EOS= __
- 66) Enter from RS232 1 up to 4 bytes, stop on EOS= __
- 67) Store in tempsonde from RS232 1
- 68) Set temp sonde to tempsonde
- 69) Append to temperatures from temp3 , temp4 , temp5 , temper6 , temp7(sortie gaz) , temp8
- 70) Append to gaz from O2 , CO , NO , NO2 , SO2 , CO2 , tempsonde
- 71) Delay Temporisation for 3 seconds
- 72) Output to Fichier Résultats with temperatures , gaz, term.= __
- 73) Close RS232 1
- 74) End Loop1

Settings for Pushbutton object "Thermocouples(cliquer pour démarrer)":

Visible: 1
 Enabled: 1
 Exec. actions at initialize: 0

Annexe n°5 : Loi de Planck.

Définition : nous considérons ici le corps noir comme un système isolé à l'équilibre thermique. Dans lequel le rayonnement est à l'état stationnaire et réfléchi totalement par les parois. Les photons peuvent être dès lors considérés comme des particules n'interagissant pas entre elles dans un puits de potentiel à parois rectilignes.

Nous avons vue à partir de la 2^{ème} année d'études universitaires (cours de physique quantique ondulatoire), que la résolution d'un tel problème est celui d'un puits de potentiel à parois rectilignes pour laquelle nous avons obtenu pour fonction d'onde :

$$\Psi_x = \Psi_{\kappa,0} \sin(\kappa x) = \Psi_{\kappa,0} \sin \left(x \cdot \sqrt{\frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} (E_{tot} - E_{pot})} \right)$$

à propos de laquelle il faut appliquer les conditions aux limites.

Appliquons les "conditions aux limites périodiques" appliquées à un tel système :

- pour $x = 0$ et $x = L_x$, nous avons : $\psi(0) = \psi(L_x) = C^{te}$
- la fonction d'onde ψ doit présenter un nombre entier de demi-longueur d'onde sur la longueur L_x .
- dans le corps noir, $U = 0$ donc $E_{pot} = 0$
- si aux extrémités ($x = 0$ et $x = L_x$) nous avons $\psi = C^{te}$ l'argument du sinus à la même valeur $n2\pi$ (à un facteur multiplicatif réel près) en 0 et en L_x .

Donc nous devons avoir :

$$L_x \cdot \sqrt{\frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} (E_{tot} - E_{pot})} = n_x 2\pi$$

et comme $E_{pot} = 0$, après quelques simplifications élémentaires, nous avons :

$$\frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} E_{tot} = \frac{n_x^2}{L_x^2} 4\pi^2 \Rightarrow E_{n,x} = \frac{n_x^2}{L_x^2} 4\pi^2 \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} = \frac{n_x^2}{L_x^2} \frac{8\pi^2 \hbar^2}{8m} = \frac{n_x^2}{L_x^2} \frac{\pi^2 \hbar^2}{m}$$

L'énergie totale de la particule présente donc une suite discrète de valeurs, les seules permises. La valeur de L est quant à elle déterminée à l'aide du modèle de Bohr ou de Sommerfeld en fonction des cas.

Puisque les fonctions d'onde correspondantes dans le puits sont $U = 0 \equiv E_{pot} = 0$, nous avons donc:

$$\begin{aligned}\Psi_x &= \Psi_{x,0} \sin \left(x \cdot \sqrt{\frac{8\pi^2 m E_{tot}}{\hbar^2}} \right) = \Psi_{x,0} \sin \left(x \cdot \sqrt{\frac{8\pi^2 m n_x^2 \pi^2 \hbar^2}{\hbar^2 L_x^2 m}} \right) = \Psi_{x,0} \sin \left(x \cdot \sqrt{\frac{4\pi^2 n_x^2}{L_x^2}} \right) \\ &= \Psi_{x,0} \sin \left(\frac{2\pi n_x}{L_x} \cdot x \right) = \Psi_{x,0} \sin(k_x \cdot x)\end{aligned}$$

Ainsi, l'énergie totale peut s'écrire : $E_{n,x} = \frac{n_x^2 \pi^2 \hbar^2}{L_x^2 m} = \frac{\hbar^2}{2m} k_x^2$

Ainsi, étant donné que la fonction d'onde est une probabilité conditionnelle, nous avons sous forme de phaseur :

$$\psi = \psi_x \psi_y \psi_z = C^{te} e^{ik_1 x} e^{ik_2 y} e^{ik_3 z} = C^{te} e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

et les énergies discrètes associées sont alors :

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = \frac{\hbar^2}{2m} \|\vec{K}\|^2$$

Le vecteur \vec{K} étant donc défini par :

$$\vec{K} = \left(n_x \frac{2\pi}{L_x}, n_y \frac{2\pi}{L_y}, n_z \frac{2\pi}{L_z} \right)$$

Les vecteurs \vec{K} qui nous intéressent (puisque'ils représentent respectivement chacun un micro état possible), plongé dans l'espace des phases des nombre d'onde, ont leur extrémité situées en l'un des nœuds d'un réseau tridimensionnel constitué de mailles élémentaires dont les arêtes sont parallèles aux axes et qui mesurent respectivement $2\pi/L_x$, $2\pi/L_y$, $2\pi/L_z$, . Nous voulons évaluer le nombre de vecteurs pour lesquels cette extrémité tombe dans l'intervalle entre les deux sphères centrées à l'origine et de rayons de norme K et $K+dK$. Le volume de la coquille sphérique comprise entre les deux sphères est donc donnée par : $dV = 4\pi K^2 dK$

Le nombre de mailles élémentaires (de micro états) incluses dans cette région de l'espace des \vec{K} est, à peu de chose près, égal au nombre de fois que son volume contient celui de la maille élémentaire, qui vaut :

$$\frac{2\pi}{L_x} \cdot \frac{2\pi}{L_y} \cdot \frac{2\pi}{L_z} = \frac{8\pi^3}{V}$$

Nous obtenons ainsi le nombre de micro états dans le volume dV (donc la densité de micro états) :

$$\frac{4\pi K^2 dK}{\frac{8\pi^3}{V}} = \frac{VK^2 dK}{2\pi^2}$$

Or, en mécanique ondulatoire, physique quantique, corpusculaire et relativité restreinte, nous avons vu à partir de la 2^{ème} année, les relations suivantes :

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

Donc : $K^2 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{1}{c} d\omega$

Il vient : $\frac{VK^2 dK}{2\pi^2} = \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c^3} d\omega = \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c^3} d\omega = \frac{V8\pi^2 \nu^2}{2\pi^2 c^3} 2\pi d\nu = \frac{V16\pi \nu^2}{2c^3} d\nu = \frac{V8\pi \nu^2}{c^3} d\nu$

Dans un corps noir à l'équilibre thermodynamique, les photons forment un gaz dont les constituant n'interagissent pas entre eux chimiquement. Ce type de situation est typiquement décrite par la distribution de Bose-Einstein que nous avons vu en mécanique statistique au niveau de la Maîtrise. Ainsi, puisque $\mu = 0$, nous avons dans

$$n_i = \frac{g_i}{\exp\left(\frac{E_i}{kT}\right) - 1} = \frac{g_i(\nu)}{\exp\left(\frac{h\nu_i}{kT}\right) - 1}$$

le cas d'un spectre discret d'états :

et dans un cas que nous considérons comme continu :

$$dn = \frac{g(\nu)}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \frac{V8\pi \nu^2 \omega}{c^3} \frac{d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

Dans le corps noir, nous avons pour énergie interne :

$$U = \sum_i E_i n_i = \int_0^\infty h\nu \frac{V8\pi \nu^2 \omega}{c^3} \frac{d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = V \int_0^\infty \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$

$$\Rightarrow \frac{U}{V} = \int_0^\infty \rho(\nu, T) d\nu \quad [J \cdot m^3]$$

La radiation d'un corps noir est donc donnée par :

$R(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \frac{2\hbar \omega^3}{\pi c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1} \quad [J \cdot s \cdot m^{-3}]$

$$R(\nu, T) d\nu = R(\lambda, T) d\lambda$$

et puisque :

et

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{-c}{\lambda^2}$$

$$R(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{-c}{\lambda^2} R(\nu, T) = R(\lambda, T)$$

donc :

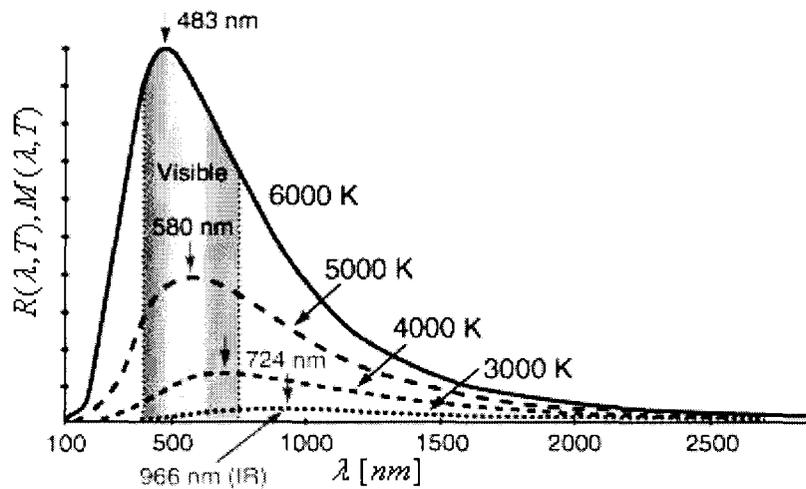
Or, comme $R(\lambda, T) \geq 0, R(\nu, T) \geq 0$, il convient de prendre la valeur absolue tel que :

Enfin, nous obtenons encore une autre forme de la loi de Planck :

$$R(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda} = \left| -\frac{c}{\lambda^2} \right| R(\nu, T) = \frac{c}{\lambda^2} R(\nu, T)$$

$$R(\lambda, T) = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

La loi de Planck démontrée ci-dessus est parfaitement vérifiée par l'expérience dans tout le domaine de températures accessibles à ce jour :



Annexe n°6 : facteurs de forme gris (Bruno CHERON [63])

Afin de calculer rapidement un facteur de forme on utilise deux règles :

1. La règle de complémentarité : La somme de tous les facteurs de formes des

surfaces S_1, S_2, \dots, S_N , est égale à l'unité :
$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (A.5.1)$$

2. La règle de réciprocité :

$$S_i F_{ij} = S_j F_{ji} \quad (A.5.2)$$

donne les facteurs de forme de deux cylindres emboîtés l'un dans l'autre (figure 88), déduits de ces règles:

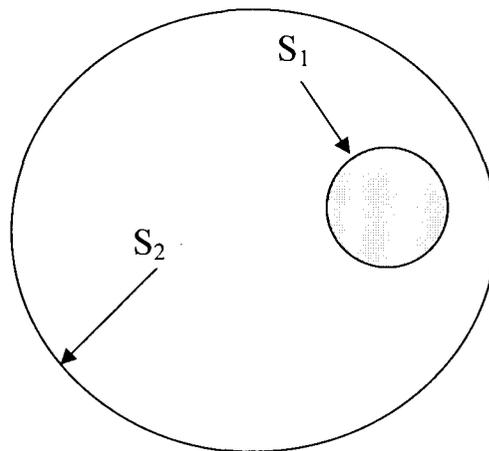


Figure 88: Cylindres emboîtés.

$$F_{11} = 0, F_{12} = 1, F_{21} = R_1/R_2, F_{22} = 1 - R_1/R_2. \quad (A.5.3)$$

3. Puissance radiative nette échangée par deux surfaces :

La puissance radiative nette entre la surface S_i et la surface S_j est donnée par la relation :

$$\phi_{ij}^n = \phi_{ij} - \phi_{ji} = F_{ij} S_i M_i^0 - F_{ji} S_j M_j^0 \quad (A.5.4)$$

Soit, selon la règle de réciprocité :

$$\phi_{ij}^n = S_i F_{ij} (M_i^0 - M_j^0) \quad (A.5.5)$$

La puissance radiative nette s'une surface noire S_i est obtenue par sommation :

$$\phi_i^n = \sum_j \phi_{ij}^n = S_i \sum_j F_{ij} (M_i^0 - M_j^0) \quad (\text{A.5.6})$$

4. Flux radiatif net d'une surface grise.

Un corps gris absorbe une partie du rayonnement qu'il reçoit et en réfléchit une autre. On appelle réflectivité, que nous noterons ici: \mathfrak{R} , la proportion du rayonnement réfléchi par rapport au rayonnement total. Elle est reliée à l'émissivité par la relation : $\varepsilon = 1 - \mathfrak{R}$. ε étant l'émissivité du corps gris. Un détecteur placé près d'une surface reçoit un flux radiatif qui est la somme de deux composantes : le flux émis par cette surface du fait de sa température et le flux incident qu'elle réfléchit. On appelle « radiosité totale » la somme de ces deux contributions par unité de surface :

$$\phi^n = \varepsilon S (M^0 - E) = \frac{\varepsilon S}{1 - \varepsilon} (M^0 - J). \quad (\text{A.5.7})$$

5. Analogie électrique : facteur de forme gris

Le flux radiatif net est :

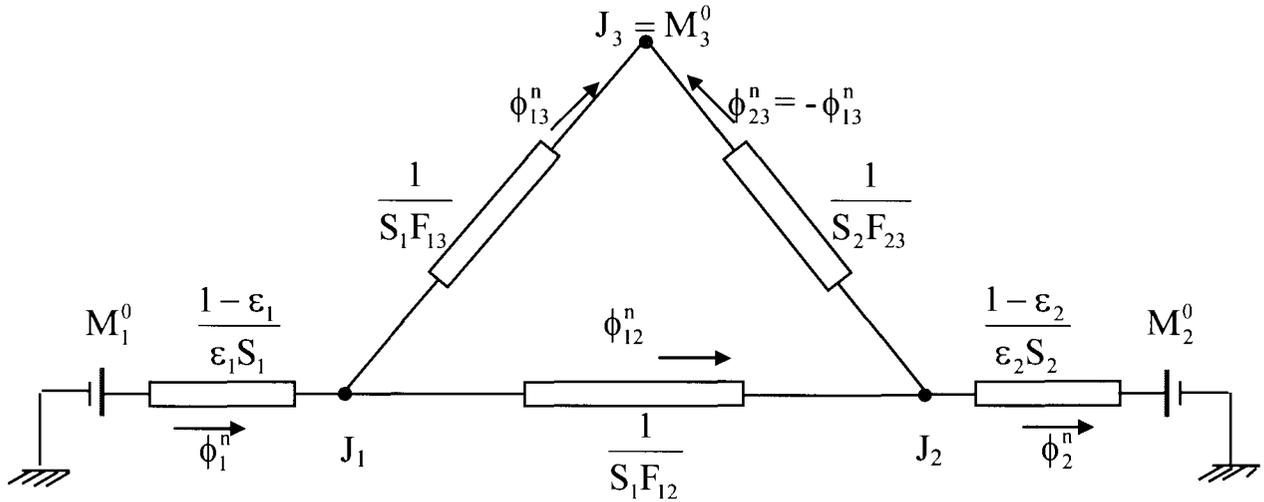
- pour une surface i :

$$\phi_i^n = (M_i^0 - J_i) \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i S_i} \right)^{-1} \quad (\text{A.5.8})$$

- pour une surface i vis-à-vis de la surface j :

$$\phi_{ij}^n = (J_i - J_j) \left(\frac{1}{S_i F_{ij}} \right)^{-1} \quad (\text{A.5.9})$$

Si on prend l'existance du corps noir comme référence, on remarquera une analogie avec les dipôles électriques. Le potentiel de référence est l'existance du corps noir. Le flux radiatif net (équivalent au courant) est transporté à travers la résistance $\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i S_i}$ jusqu'au potentiel de radiosité ; il se répartie ensuite en deux flux qui traversent les résistances $\frac{1}{S_i F_{ij}}$. La figure 89, présente le schéma équivalent à trois surfaces grises dont l'une est réfractaire (potentiel de référence).



Dans le cas de deux surfaces grises en présence, le flux net échangé est alors :

$$\phi_{12}^n = (M_1^0 - M_2^0) \left[\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 S_1} + \frac{1}{S_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 S_2} \right]^{-1} \quad (A.5.10).$$

Par analogie avec l'échange entre deux corps noirs, on introduit le « facteur de forme gris » défini par la relation :

$$\phi_{12}^n = S_1 \mathfrak{F}_{12} (M_1^0 - M_2^0) \quad (A.5.11)$$

Dans le cas d'un « petit » système rayonnant vers un « grand » système, il vient :

$$\lim_{S_2 \gg S_1} \mathfrak{F}_{12} = \left(\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} \right)^{-1} \approx \epsilon_1 \quad (A.5.12)$$

En affectant l'indice 1 à la flamme et l'indice 2 au réfractaire on obtient le flux net échangé entre la flamme et le réfractaire :

$$\phi_{fr} = \epsilon_f (M_f^0 - M_r^0) = \epsilon_f S_f \sigma (T_f^4 - T_r^4) \quad (A.5.13)$$

Le flux ci-dessus peut-être obtenu en posant $\epsilon_2 = 1$ dans l'équation (A.5.10), autrement dit, S_2 (le réfractaire) se comporte comme un corps noir vis-à-vis de S_1 (la flamme).

En assimilant la flamme à un « plan » vis-à-vis du lit solide (qui est plus ou moins plan), nous avons deux plans parallèles proches et on obtient

$$\mathfrak{F}_{12} = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}. \text{ Pour } \epsilon_2 = 1, \text{ on retrouve l'équation (A.5.13) en}$$

remplaçant le réfractaire (indice « r ») par le lit solide (indice « s »).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Article 1er de la loi du 15 juillet 1975, Codifié à l'article L 541-1 du code de l'environnement, (Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, article 1er - I.)

2 Ministère de l'Environnement et de l'Eau. Décret n° 97-110/PRES du 17 mars 1997 portant promulgation de la loi n° 005/97/ADP du 30 janvier 1997. Code de l'environnement du Burkina Faso.

3 Article 2-1 de la loi Française du 15 juillet 1975, Codifié à l'article L 541-24 du code de l'environnement (Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, article 1er-III)

4 Loi Française n° 92-646 du 13 juillet 1992, article 1er-II

5 Directive 1999/31/CE du conseil du 26 avril 1999 - JOCE du 16 juillet 1999.

6 Michel MAES, Option déchets, page 155, 1992

7 ANRED, Observatoire National des Déchets (France), mars 1992

8 Série d'études de cas de gestion des déchets solides municipaux au Burkina Faso (PDM-GREAO/AO IAGU) avril 1995

9 Pierre VANDEKERKHOVE, Centre de tri de Chambéry, 928 Avenue de la Houille Blanche, **Conseil général de la Savoie**, 73000 CHAMBERY, France.

10 WILLIAMS P.T., BESLERS S. « The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis » *Renewable energy*, vol. 7, n°3, pp 233-250, 1996.

- 11 **SEEKER W.R.**, « Waste combustion », Proc. 23rd International Symposium on Combustion, Orléans, France, 22-27 juillet 1990, p33.
- 12 **Jacques PANTALONI et Lounés TADRIS**, Etat de l'art sur les techniques de l'incinération des déchets. Organisé par les clubs CRIN, mars 1996.
- 13 **La gestion des déchets en France**, évolutions essentielles depuis 1992. ADEME, Angers, 2001.
- 14 **M. Georgalis, P. NOWAK, M. Salcudean and I.S. Garshore** Mathematical modelling of lime kilns.
- 15 **JAUHARI R, GRAY M.R. & MASLIYA J.H.**, « Gas-solid mass transfer in a rotating drum », Candian Journal of Chemical Engineering, 76, pp 224-232.
- 16 **SIKO**, Permata Plaza 8th Floor, Jl. M.H. Thamrin 57, J a k a r t a – 10350, Indonesia.
- 17 **Rovaglio M. MANCA M.D. & BIARDI G.** « Dynamic modelling of waste incineration plants with rotary kilns : comparisons between experimental and simulation data » Chem. Eng. Sci., 53 (15) pp2727-2742. 1998
- 18 **THEODORE L. and REYNOLDS J.**
Introduction to hazardous Waste Incineration - John Wiley and Sons- 1987
- 19 **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, Technical support documents, Office of Solid Waste and Emergency Response. 401 M Street, SW Washington DC 20460.

- 20 Paul M. LEMIEUX and Jeffrey V. RYAN**, « Enhanced formation of dioxins and furans from combustion devices by addition of trace quantities of bromine », *Waste Management*, vol.18, pp361-370, 1998.
- 21 Procédé d'incinération par four à grille**. Van Roll Inova. 4, allée Armand Camus, F. 92565.
- 22 Rapport d'information n° 098-415 du Sénat Français**.
- 23 André DUMEZ et Marc DUMEZ**, *Le diagnostic énergétique des chaufferies*, Les éditions Parisiennes, 1999.
- 24 Somrat KERDSUWAN**. « Contribution à l'étude de l'incinération des déchets urbains : expérimentation en four thermique rotatif, optimisation et modélisation thermique en fonctionnement ». Thèse de Docteur de l'Université de Poitiers, 1994.
- 25 PERRON, J & BUI, RT**, « Rotary cylinders: Transverse bed motion prediction by rheological analysis », *Canadian Journal of Chemical Engineering* 70 :223-231 (1992).
- 26 PERRON, J., BUI, RT & NGUYEN, T.H.**, « Modélisation du four de calcination du coke de pétrole : 1. Le modèle » *Canadian Journal of Chemical Engineering* 70 :1108-1119 (1992).
- 27 PERRON, J., BUI, RT & NGUYEN, T.H.**, « Modélisation du four de calcination du coke de pétrole : 2. Simulation du procédé » *Canadian Journal of Chemical Engineering* 70 :1108-1119 (1992).

28 Jorge J. CASTRO, Francis J. DOYLE and Thomas KENDI, "Mathematical model for the simulation and control of rotary lime kiln". Department of Chemical Engineering, University of Delaware, NEWARK, DE 1976.

29 A. KOIVO and J. CHASE. Determination of a Mathematical Model for a lime Kiln. In IFAC/IFP Conference on Digital Computer Application to Process Control, paper XII-3, 1971

30 B. VOGLER, H.P. JÖRGL, Technological University of Vienna, Austria, Gubhausstr. 27-29, A-1040 Vienna.

31 A.R. KHOEI, I. MASTERS & D.T. GETHIN, « Numerical modelling of the rotary furnace in aluminium recycling process. Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, P.O. Box 11365-8639, Teheran, Iran.

32 K.S. CHEN, W.T. HSU, Y.C. LIN & Y.T. HO, Journal of the Air & Waste management Association. 51 :885-894, June 2001.

33 Michael David Heydenrych. « Modelling of rotary kilns », Thesis University of Twente, The Netherlands, 2001.

34 David A. Tillman, The combustion of solid fuels and wastes, p9 à 34. 1991.

35 Heinen H, Brimacombe J.K. & Wakkinson A.P. « Experimental study of transverse bed motion in rotary kiln », Metal Trans, 14 B, 1983, pp 191-205

36 P.S. KOCHAR, « Simulation of Rotary Lime Kiln : Impact of Alternative Fuels and Dams. PhD Thesis, University of Idaho, 1983. Department of Chemical Engineering.

- 37 TILMAN A.D., ROSSI A.J. & KATHERINE M.V.** « Rotary kiln incineration systems for solid hazardous waste » *Chemical Engineering Process*, 19-30, July, 1990.
- 38 W. C. SEAMAN** « Passage of solids through rotary kiln- factors affecting time of passage. *Chem. Eng. Progr.* 47, p 508-514, 1951.
- 39 Hans – Joachin GERMAN, Clausthal-ZELLERFELD & al.** « Residence time behavior of wastes in rotary kilns- Experimental investigation and mathematical modelling. » *VDI-Berichte 1629*, ISBN 3-18-0911629-X
- 40 PROUST Mélanie**, *Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou*, Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, Université de Ouagadougou, avril 2001.
- 41 J. TEZANOU, J. KOULIDIATI, T. ROGAUME, F. JABOUILLE, T. ANDZI BARHE, M. SOUGOTI, P. KAFANDO, B.G. SEGDA, JC GOUDEAU, P. JOULAIN** « Caractérisation expérimentale des ordures ménagères des pays en voie de développement (P.E.D.) : cas de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso), *Anales de l'Université de Ouagadougou – Série C*, Vol. 001, 2003.
- 42 Yann ROGAUME**, « Physico chimie de la dégradation thermique des molécules azotées : cas du polyamide et du polyuréthane », Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 1999.
- 43 Robert P.** « De la forêt aux chaufferies à bois à alimentation automatique », 1985, p.9.

44 DUMON R. et GELUS M., « Valorisation chimique du bois », cha III : « Préparation chimique du bois de feu », Edition Masson, 1982. Pp 8,9,11.

45 BEAUMONT O. « La combustion du bois », Biomasse actualité n° 17, mars 1985.

46 Xiaohua ZHOU, Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1994, page 33.

47 Xiaohua ZHOU, Contribution à l'étude de l'incinération des déchets ménagers, mesure du pouvoir calorifique. Rapport de DEA, Université de Poitiers, 1990.

48 ZHOU X., GOUDEAU J. C., BREGEON B Characteristics of combustion of the heterogeneous solid combustibles: A new method for determination of the calorific value. International congress on Energy and Environment, Opatija, Croatie, 1992.

49 ZHOU X., GOUDEAU J. C., KERDSUWAN S. Méthode de détermination des caractéristiques de combustion et du pouvoir calorifique inférieur des combustibles solides hétérogènes. Colloque Franco-Marocain, Marrakech, Maroc, 1992.

50 ZHOU X., GOUDEAU J. C., KERDSUWAN S., BREGEON B Combustion mechanism of wood and cardboard waste: experimentation in a fixed bed reactor. International congress on Energy and Environment, Opatija, Croatie, 1992.

51 Manuel technique du brûleur RG1, Riello Gulliver, **RIELLO S.p.A. Via degli Alpini, 1 - 37045 Legnago (VR) Italie.**

52 Testpoint Quick Start, Manuel en Français, **KEYTHLEY Instruments, SARL**, 3 allée des Garays, BP 60, F-91121 Palaiseau Cedex, Phone : 01-60-11-51-55, Fax : 01-

53 Florent JABOULE, « Contribution à l'étude des facteurs d'émission des oxydes d'azote lors de l'incinération des déchets ménagers ». Thèse de Docteur de l'Université de Poitiers, 1996.

54 Thomas ROGAUME « Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants dans l'incinération des déchets ménagers », Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, septembre 2001.

55 Jacques TEZANOU, « Evaluation environnemental et technique de la gestion des déchets ménagers de Ouagadougou : Schémas de gestion et expérimentation de traitement thermique », Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 2003.

56 Agathe BOURCHENIN, « Etude de la dégradation thermique des composés représentatifs de la fraction combustible des déchets ménagers ». Mémoire de Diplôme d'Etudes Pratiques Scientifiques de l'Université de Poitiers.

57 Xiaohua ZHOU, « Influence des paramètres de fonctionnement sur la performance thermique et la formation des polluants en incinérateur ». Rapport de stage postdoctoral, LCD, Université de Poitiers, 1995.

58 Timoléon ANDZI BARHE, « Etude expérimentale et numérique des paramètres opératoires sur les mécanisme de formation des oxydes d'azote lors de la combustion de mélanges de matériaux cellulosiques et plastiques », Thèse de Docteur de l'Université de Poitiers, octobre 2004.

59 SEAMAN, WC, « Passage of solid through rotary kiln », *Chemical Engineering Progress*, 47, 1951, pp 508-514.

60 SULLIVAN J.D., PAIER C.G. & RALSTON O.C. « Passage of solids particles through rotary cylindrical kilns. US Bureau of Mines, Technical Papers 384, p 1-42., 1927.

61 David C. Arney, Kathleen G. Snook “Mathematical Modelling in the USMA Curriculum”, United State Military Academy, Department of Mathematics, page 13, 1999.

62 Frank P. INCROPERA, David P. DEWITT, «Fundamentals of Heat and Mass Transfer». 4th edition, page 295, John Wiley & Sons publisher, 1996.

63 Bruno CHERON. « Transferts thermiques », page 24, Editions Ellipses, 1999.

64 Marlin, T. «Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance » Chapter 3: Mathematical modelling principles. McGraw Hill, New York, 2000. (ISBN 0-07-039362-1).

65 NZIHOU, J.F., « Influence of operation parameters on the performance of a laboratory scale rotary kiln ». Article en préparation.

66 ECKERT, E. R. G. « Radiation : Relations and Properties » in W.M. Rohsenow and J.P. HARNETT Editors, *Handbook of Heat Transfer*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1973.

67 BUEKENS A.G., SCHOETERS J.O. « Fundamentals of thermochemical biomass conversion. OVEREND R.P. Elsevier Applied Sciences Publisher, 1985. London, New York pp 619.

- 68 KANURY A. M., BLACKSHEAR P. L.** « Some considerations pertaining to the problem of wood burning », *Combustion science and technology*, 1970, Vol. 1, pp 339-355.
- 69 SIEGEL R., HOWELL J. R.** « Thermal radiation heat transfers ». Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 70 BRAMFORD C.H., CRAANK J., MALAN P.H.,** « Combustion of wood ». *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 1946.
- 71 WEATHERFORD W. D., SHEPPARD D. M. ,** «Basic studies of the mechanism of ignition of cellulosics materials », Tenth International Symposium on Combustion, The combustion institute, 1965, pp897-910.
- 72 THOMAS P. H. , BOWES P. C.,** « Some aspects of the self-heating and ignition of solid cellulosic materials». *Brit. J. Appl. Phys.* 1961, 12 (5) pp 222-229.
- 73 LASSEIGNE D. G., OLMSTEAD W. E. g** » Ignition of a combustion solid with reactant consumption. *Siam. J. Appl. Math.* Vol 47, n°2, 1987 pp332-342.
- 74 CHEN P., PEI C. T. D.,** « A mathematical model of drying process, » *Int. J. of Heat Mass Transfert.* 32,, 1989, pp297-310.
- 75 SHENE C, CUBILLOS F., PEREZ R., ALVAREZ P. I.** « Modelling and simulation of a Direct Contact Rotary Dryer ». *Drying Technology* 14, 1996, pp2419-2433.

Résumé

Face à l'accroissement des quantités des déchets et la venue de normes environnementales de plus en plus strictes, l'incinération des déchets se trouve être l'un des moyens de traitement de déchets les plus utilisés.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons d'abord proposé un déchet modèle simple représentatif pour la ville de Ouagadougou. Nous avons ensuite étudié la combustion de ce déchet modèle dans un four rotatif pilote de laboratoire. La combustion du bois, du carton et du plastique, seul ou en mélange dans les proportions du déchet modèle a été étudiée. Ont été examinés les effets de :

- la vitesse de rotation
- la charge dans le four
- l'excès d'air.

Un choix judicieux de la charge dans le four et de la vitesse de rotation ont permis d'obtenir des rendements de combustion optimaux et une réduction des émissions polluantes.

Une étude bidimensionnelle du transport de masse et des échanges d'énergie dans la chambre de combustion a été faite.

Mots clés :

- Déchet
- Bois, carton, plastique
- Modèle
- Incinération
- Température
- Emissions gazeuses
- Vitesse de rotation.