

# Contribution à l'étude du traitement thermique des ordures ménagères des pays en voie de développement (P.E.D.)

J. TEZANOU<sup>1,2</sup>, J. KOULIDIATI<sup>1</sup>, T. ROGAUME<sup>2</sup>, T. ANDZI BARHE<sup>1,2</sup>, F. JABOUILLE<sup>2</sup>,  
M. SOUGOTI<sup>1</sup>, P. KAFANDO<sup>1</sup>, A. BERE<sup>1</sup>, B.G. SEGDA<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Université de Ouagadougou, UFR-SEA, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement, 03 BP 7021 Ouagadougou 03 – BURKINA FASO

<sup>2</sup> Université de Poitiers – ENSMA, Laboratoire de Combustion et de Détonique,  
Téléport 2 – BP 109 – Chasseneuil-du Poitou, 86960, FUTUROSCOPE CEDEX.

## RÉSUMÉ

*À la suite de la caractérisation des ordures ménagères de Ouagadougou, nous avons pu quantifier la fraction combustible de ces déchets. Bien que le taux d'inertes soit important, ce qui conduit à un pouvoir calorifique inférieur (PCI) modeste, cette fraction combustible remplit néanmoins les conditions d'incinérabilité. Il nous a donc semblé nécessaire de réaliser une étude expérimentale sur l'incinération de cette fraction combustible dans la continuité des études menées antérieurement. Ces études portent pour la plupart d'entre elles sur la réduction, par des techniques primaires, des polluants azotés émis lors de l'incinération des déchets ménagers et industriels. Nous avons montré le rôle de l'excès d'air primaire, secondaire et total que nous avons optimisé. Nous avons également étudié l'émission des gaz de combustion et la vitesse de perte de masse du combustible en fonction de la température.*

## ABSTRACT

*Following the characterization of the kitchen refuses from Ouagadougou, we have quantified the combustible portion of these refuse. Although the rate of inert is significant, implying a low inferior calorific power, this combustible fulfils all the requirements for incineration. So it appears for us necessary to carry out research on the incineration of this combustible portion, in the continuation of the former research. Most of these research focus, using primary techniques, on the reduction of nitrogenous pollutant emitted through the incineration of the kitchen and industrial waste. We have shown the role of the excess primary, secondary and total air that we have optimised. We have also studied the emission of combustion gas and the speed of the combustible according to the temperature.*

## I- INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans la suite de celles menées [1], [2], [3], [4] et dont la finalité est de mieux connaître et d'optimiser les mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote lors de l'incinération des ordures ménagères.

Il est important de savoir l'influence des débits d'air (primaire, secondaire et total) et leurs influences sur la formation des oxydes d'azote. Nous souhaitons optimiser les paramètres de combustion.

Une fois ces paramètres importants optimisés, on peut, dans ces conditions, se poser la question de l'influence de la composition du mélange expérimental sur les mécanismes de combustion et sur les émissions d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone. C'est pourquoi, nous avons utilisé un déchet modèle (à base de bois, de carton et de plastiques) représentatif de la fraction combustible des ordures ménagères de Ouagadougou. Le but ici est d'étudier l'influence de diffé-

rents excès d'air sur l'incinérabilité de ce mélange, son comportement en fonction des paramètres de combustion (température, vitesse de perte de masse) ainsi que la formation des polluants gazeux (CO et NO) émis lors de sa combustion.

La première partie traite de l'étude expérimentale que nous avons réalisée à partir d'un échantillon représentatif de la fraction combustible de ces ordures ménagères. La deuxième présente les résultats et la discussion avant la conclusion.

## II - APPAREILLAGE, MÉTHODES D'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET EXPÉRIMENTATION EN RÉACTEUR À LIT FIXE

Lors de l'incinération des déchets ménagers en four à grilles, la majorité des oxydes d'azote formés (95%) se trouve sous forme de monoxyde d'azote (NO) [5], [6]. Trois mécanismes ont été mis en évidence :

- le mécanisme du NO thermique,
- le mécanisme du NO du combustible,
- le mécanisme du NO précoce.

Les mécanismes de formation et de destruction ont été étudiés de même que les techniques de réduction des NOx [4], [7].

L'appareillage utilisé dans notre étude se compose de :

- un réacteur à lit fixe et à contre courant
- un dispositif d'alimentation et de mesure du comburant
- un conduit d'évacuation des fumées
- un analyseur de gaz
- un système de piégeage des cendres volantes et d'extraction des fumées
- un système d'acquisition et de traitement des données.

Le schéma du dispositif expérimental et les précisions concernant son fonctionnement sont bien décrits dans [3], [4] et [7]. Le réacteur simule le processus de combustion d'une tranche verticale de combustible au sein d'un four à grilles. La figure 1 illustre la correspondance entre un four industriel à grilles et le réacteur à lit fixe à contre courant. Le réacteur dont une coupe schématique est présentée sur la figure 2 est un cylindre de 2 mètres de haut et 0,2 m de diamètre intérieur.

Le système d'acquisition des données comprend :

- 28 capteurs de températures,
- des débitmètres massiques pour les mesures de débit d'airs primaire et secondaire,
- un analyseur de combustion l'analyse des gaz de combustion.
- l'ensemble des signaux provenant des multiples capteurs converge vers un micro ordinateur qui permet, grâce à des cartes d'acquisition, le stockage régulier des données.

L'analyseur des gaz de combustion de type TESTO-TERM 350 est équipé de cellules électrochimiques permettant de mesurer en continu les teneurs en CO, NO, NO2, SO2 et O2 et le calcul du taux de CO2 en fonction de celui du dioxygène et du type de combustible. Ils est directement relié au micro ordinateur à l'aide d'un bus RS 232.

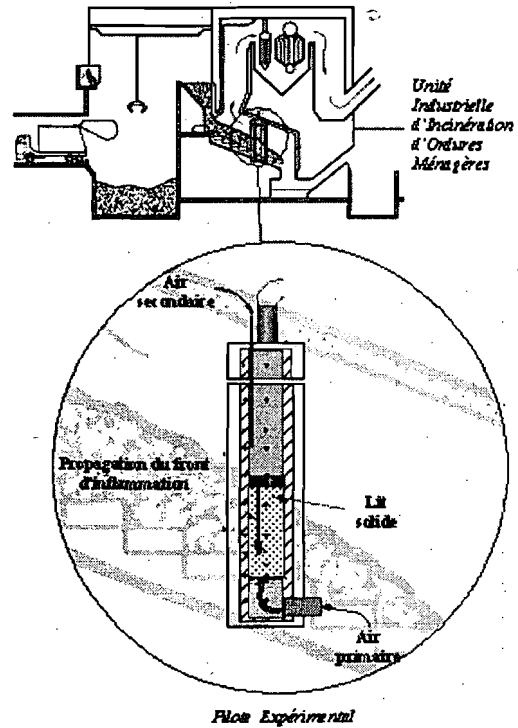


Figure 1 : correspondance entre four industriel à grilles et réacteur à lit fixe à contre courant

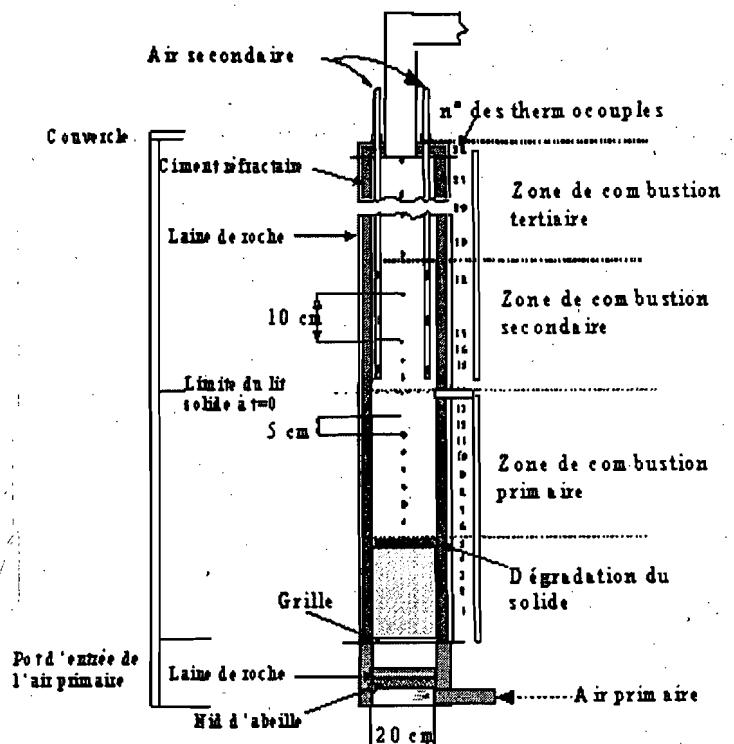


Figure 2 : coupe schématique du réacteur à lit fixe à contre courant

III – MATÉRIAUX UTILISÉS

3.1. - Le combustible

La composition des ordures ménagères de Ouagadougou et leur hétérogénéité ont été déterminés par la caractérisation. Les expériences d'incinération ont été conduites avec un mélange représentatif de la fraction combustible des ces déchets. En effet, la faible masse de combustible nécessaire à chaque expérience (1400 g) est une barrière à l'utilisation des déchets ménagers bruts. Par ailleurs, leur hétérogénéité et la difficulté d'échantillonnage rendent aléatoire l'obtention d'un déchet reproductible.

Les pourcentages de répartition entre les constituants ont été calculés à partir de la composition de la fraction combustible des déchets ménagers donnée par la caractérisation.

Le « déchet modèle » objet de notre étude expérimentale a la composition suivante :

- 54 % de bois,
- 24 % de carton,
- 19 % de polyéthylène téréphtalate (PET),
- 3 % de polyamide 6-6 (PA).

Pour éviter les problèmes de corrosion dus au chlore, les plastiques retenus pour cette étude (polyéthylène téréphtalate et polyamide) sont exempts de chlore. Le polyamide a été retenu pour sa forte teneur en azote, ce qui permet à notre déchet modèle d'avoir une composition en azote identique à celle des ordures ménagères [8]. Des échantillons de chaque composant du mélange combustible ont été analysés pour le dosage des éléments C, H, O, N, S. Le tableau 1 présente le bilan des compositions massiques de chaque composant.

Tableau 1 : composition élémentaire des composés du mélange expérimental

Eléments	Bois (54%)	Carton (24%)	PET (19%)	Polyamide (3%)
C	47,6 %	39,5 %	62 %	62,4 %
H	6,4 %	5,8 %	4,2 %	9,8 %
O	45,3 %	44,3 %	33,2 %	15,7 %
N	0,2 %	0,2 %	0,1 %	12 %
S	0,2 %	0,3 %	0,3 %	0,1 %

A partir de ces valeurs et en fonction de la proportion de chaque constituant, la composition massique

du mélange combustible objet de notre étude a été déterminée (tableau 2).

Tableau 2 : Composition élémentaire du mélange expérimental

Eléments	Mélange expérimental
C (%)	48,8
H (%)	5,9
O (%)	41,9
N (%)	0,53
S (%)	0,24

3.2. - Protocole expérimental

La première étape consiste en la préparation du mélange combustible. Le bois et le carton sont préalablement séchés dans une étuve à une température de 105°C durant 24 heures, conformément à la norme NF03-002 relative au séchage des déchets. Cette opération permet de simuler la phase de séchage au sein d'une unité industrielle. Le bois utilisé est du sapin pur et se présente sous forme de copeaux. Le carton est broyé pour obtenir de petits parallélépipèdes de 2x20x20 mm<sup>3</sup>. Le polyéthylène téréphtalate est découpé sous forme de parallélépipèdes de 1x10x10 mm<sup>3</sup>. Le polyamide est sous forme de granulés. Cette répartition de taille permet de garantir un bon mélange du combustible.

IV – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

4.1. - Les conditions opératoires

Nous avons en premier lieu réalisé un calcul théorique des débits comburants permettant l'obtention de réactions de combustion complètes et définissant une combustion à la stœchiométrie. Ce calcul, dont le détail est présenté [9], montre qu'un débit comburant théorique moyen de 53 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> est nécessaire à l'obtention d'une combustion complète.

Pour tenir compte des différents phénomènes physiques qui ont lieu pendant la combustion, nous avons choisi d'exprimer les résultats en fonction de l'excès d'air de combustion dans chaque zone réactionnelle. Celui-ci est défini par le rapport comburant/combustible et est exprimé par rapport à la stœchiométrie : un excès d'air de 1 correspond à la stœchiométrie. La détermination des excès d'air est réalisée pour chaque condition expérimentale car il dépend de la valeur des débits comburants et de la vitesse de perte de masse mesurée.

Le tableau 3 présente l'excès d'air correspondant à chaque condition expérimentale testée. Q1 est le débit d'air primaire et engendre un excès d'air primaire  $e_1$ . Q2 est le débit d'air secondaire et engendre un excès d'air secondaire  $e_2$ . Qt est le débit d'air total qui engendre l'excès d'air total  $e_t$ .

d'étudier l'influence d'une variation d'excès d'air total de 1,2 à 2,5, ce qui correspond à une variation d'excès d'air primaire de 0,5 à 1,5 et d'excès d'air secondaire de 0,6 à 1.

Les conditions expérimentales testées ont permis

Les résultats présentés dans les paragraphes suivants sont des valeurs moyennes des résultats obtenus pour chaque condition expérimentale.

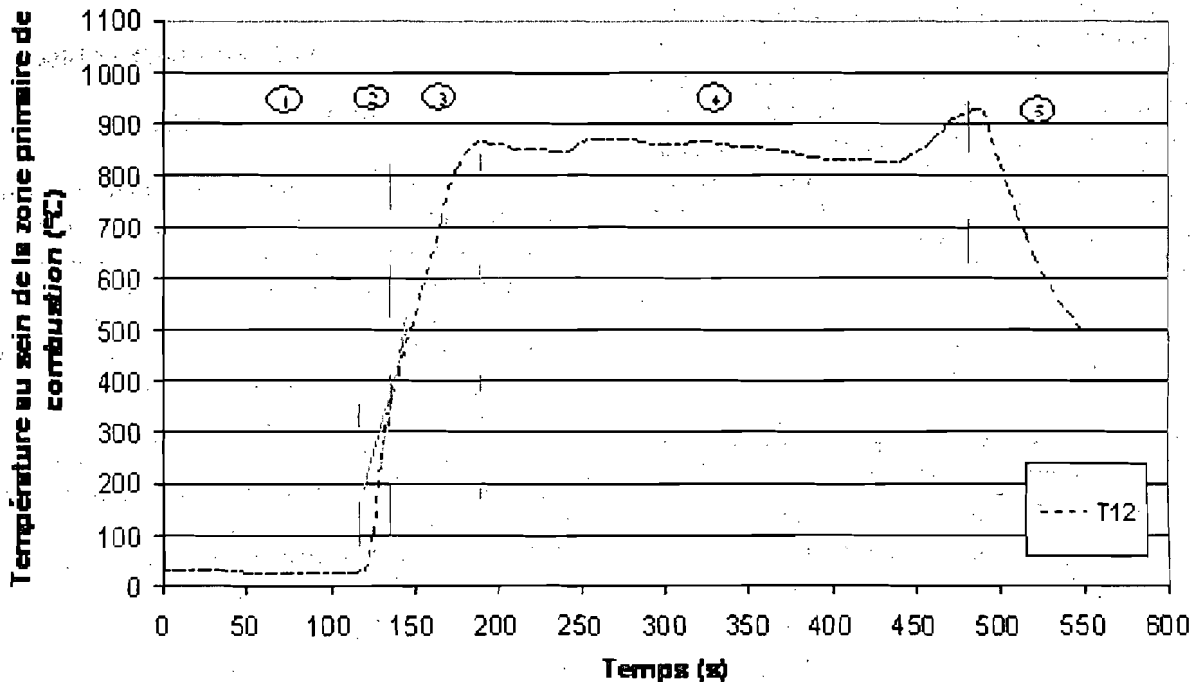
Q1(Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	35	40	40	45	45	55	55	60	60	65	65	70	70
Q2(Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	45	35	45	35	45	35	45	35	45	35	45	35	45
Qt(Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	80	75	85	80	90	90	100	95	105	100	110	105	115
$e_1$	0,5	0,7	0,7	0,8	0,8	1	1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,5	1,5
$e_2$	0,7	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,9	0,7	0,8	0,7	1
$e_t$	1,2	1,3	1,4	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2	2,1	2,2	2,5

Tableau 3 : excès d'air correspondant à chaque condition expérimentale

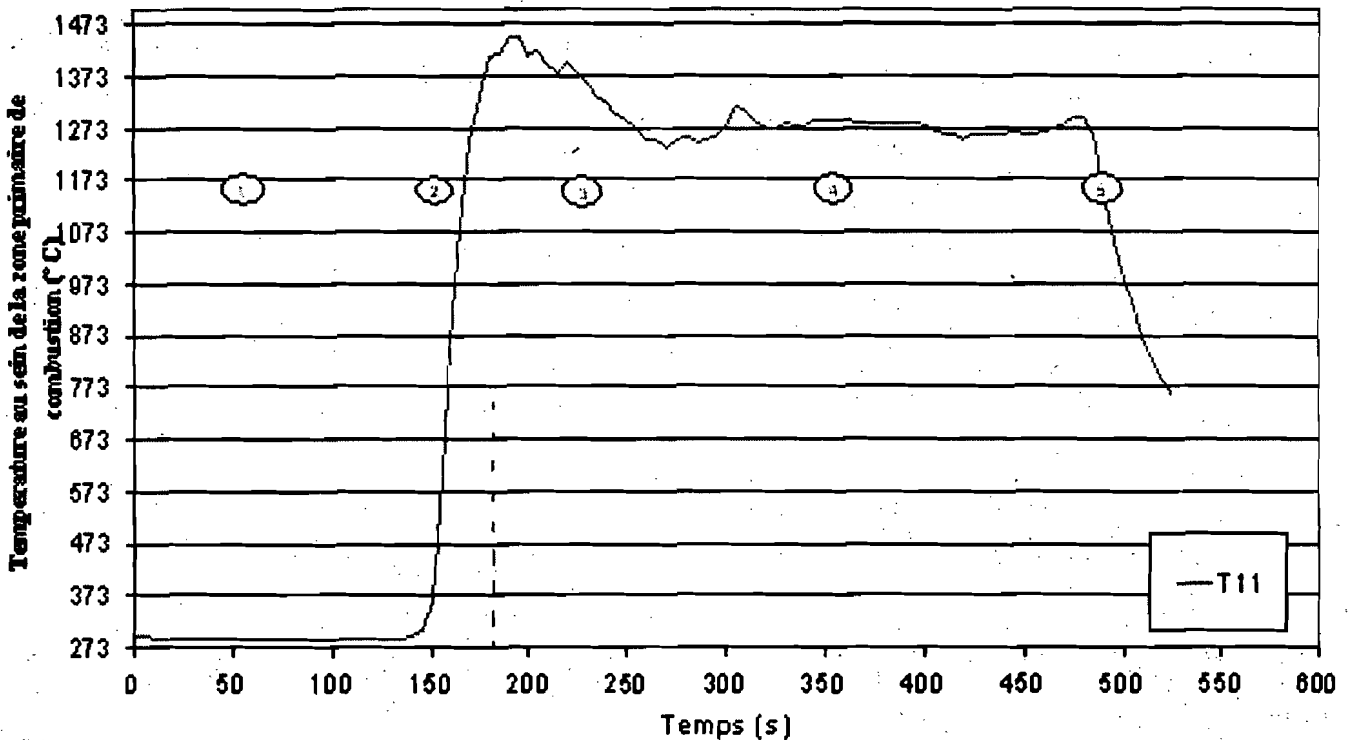
#### 4.2.- Les régimes de combustion

La figure 3 présente l'évolution de la température au sein de la zone primaire de combustion durant l'expérience. Dans cette zone (caractérisée par la dégradation du solide et la libération des espèces volatiles dont va dépendre la suite de la combustion), l'évolution de

la température diffère selon que l'excès d'air est inférieur ou supérieur à 1. Une évolution de toutes les températures en zone primaire (mesurées à l'aide des 14 thermocouples implantés dans cette zone) est étudiée [9]. Pour des raisons de clarté et de simplification, seul le profil de l'un des thermocouples est représenté ici.



(a) :  $e_1 < 1$



(b) :  $e1 > 1$

Figure 3 : évolution des températures primaires de combustion pendant une expérience pour un excès d'air primaire inférieur à 1 (a) et supérieur à 1 (b)

Quel que soit le cas de figure considéré, l'évolution des températures peut être divisé en 5 zones :

- Zone 1 : la température reste constante et proche de 20°C, correspondant à la température d'injection de l'air primaire. Le front d'inflammation est distant du thermocouple et le transfert de chaleur au sein du lit solide est très faible. Des travaux précédents [10] montrent que les échanges thermiques au sein du réacteur à lit fixe à contre courant se font principalement par rayonnement de la zone de combustion des produits volatils en mélange avec le comburant vers le lit solide. Dans le cas de figure de la zone 1, le rayonnement est stoppé par le « lit solide » de combustible qui se trouve au-dessus du thermocouple. D'autre part, on peut noter que les échanges thermiques par conduction et convection de la zone de dégradation vers le lit solide sont compensés par la convection forcée liée à l'injection de l'air primaire.

- Zone 2 et 3 : le combustible s'échauffe et la dégradation thermique de chacun des composants du mélange combustible commence. Des travaux [7], [9] montrent que cette étape de dégradation correspond à la pyrolyse des matériaux qui commence aux environs de 400°C et qui présente des profils de température caractéristiques d'une dégradation sans réaction oxydante. Au delà de 400°C, l'évolution de la température dépend de l'excès d'air :

- si l'excès d'air primaire est inférieur à 1 : figure 3-a, zone 2, une forte croissance de la température est observée. Elle correspond au passage du front d'inflammation. Le changement de pente au-delà de l'étape de pyrolyse traduit une vitesse de montée en température plus faible. Il s'agit de la troisième étape (zone 3). Le ralentissement de la vitesse de montée en température est dépendante du débit primaire qui engendre lui-même un excès d'air primaire inférieur à 1. La concentration en oxygène au sein de la zone primaire de combustion est alors faible.

- si l'excès d'air est supérieur ou égal à 1 : figure 3-b, la montée en température présente la même pente durant toute la deuxième étape. Il n'y a pas de rupture de pente, ce qui traduit une forte vitesse de dégradation et de dévolatilisation du solide, réduisant du même coup l'épaisseur de la couche de solide. La température atteint alors un maximum avant de décroître légèrement (zone 3). Cette évolution est caractéristique du développement d'une première flamme en surface du lit solide engendrée par la combustion des produits de pyrolyse en mélange avec l'air primaire. La combustion ici est caractérisée par une teneur en matière volatile élevée et est contrôlée par la vitesse de transport de l'oxygène. Elle dépend fortement de la turbulence [7, [9].

- Zone 4 : la température décroît très légèrement et se stabilise aux alentours de 950°C-1110°C (figures 3 a et b). On se situe ici dans la zone de combustion des

espèces volatiles issues de la première flamme avec l'oxygène amenée par l'air primaire. La concentration en espèces oxydantes est légèrement inférieure à celle présente au niveau de la première flamme. La combustion qui se produit ici est caractérisée par une forte turbulence. La vitesse de transport de l'oxygène en zone réactive est très importante et la cinétique chimique est le facteur limitant [7], [9].

● Zone 5 : dans un dernier temps, on observe une forte décroissance des températures. La combustion est terminée. Cette baisse intervient rapidement et s'opère au même instant en tout point du réacteur à lit fixe [9]. On n'observe pas de combustion du résidu charbonneux. En effet, la présence d'une combustion hétérogène devrait générer des températures élevées pour les derniers thermocouples proches de la grille située au fond du réacteur, ce qui n'est pas le cas.

Le profil des températures au sein de la zone primaire de combustion fait apparaître deux régimes de combustion selon que l'excès d'air est inférieur ou supérieur à 1. Cette différence d'évolution des températures traduit une modification des régimes de dégradation des solides et donc des espèces volatiles qui en découlent. Lorsque l'excès d'air est inférieur à 1, la combustion se déroule en manque d'oxygène et est contrôlée par la vitesse de transport du comburant au sein des zones réactives. A l'inverse lorsque l'excès d'air est supérieur à 1, la vitesse de dévolatilisation du solide, puis de combustion des espèces libérées est très

rapide. La combustion en zone primaire se fait en excès d'oxygène et est contrôlée par la cinétique. Enfin, il apparaît que l'oxydation du résidu charbonneux en fin de combustion est quasi inexistante. La combustion hétérogène semble négligeable lors du processus de combustion.

### 4.3. - Evolution des températures de combustion

L'optimisation des paramètres de combustion en vue de la réduction des polluants gazeux ne doit pas affecter les capacités thermiques du four. L'influence des débits comburants sur l'évolution des températures en zones primaire et secondaire de combustion a été mesurée.

#### i- Evolution de la température moyenne en zone primaire de combustion

La zone primaire de combustion est la zone au sein de laquelle prennent place la dégradation du combustible et la combustion des espèces volatiles issues de cette dégradation en mélange avec l'air primaire. La détermination de la température moyenne de cette zone est réalisée à partir de la valeur moyenne de la température enregistrée par chaque thermocouple en zone établie de combustion (cf. zone 4, figure 3). La figure 4 présente l'évolution de la température primaire de combustion en fonction de l'excès d'air total. Les résultats sont présentés pour différents excès d'air primaire (e1).

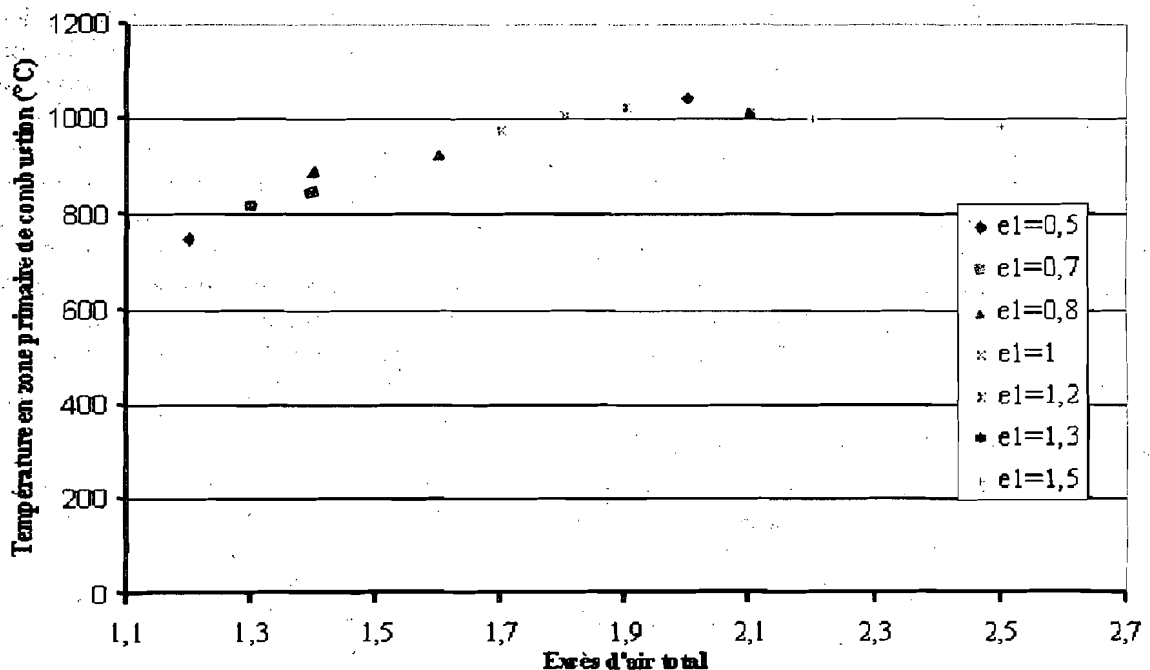


Figure 4 : évolution de la température en zone primaire de combustion

Ce graphe peut être divisé en deux parties selon que l'excès d'air primaire est inférieur ou supérieur à 1, ce qui se traduit par un excès d'air total inférieur ou supérieur à 1,7 pour nos conditions expérimentales. Ce profil de température est assez proche de celui déjà obtenu [7] :

**\* Excès d'air primaire inférieur à 1 (et < 1,7) :** la température au sein de la zone primaire de combustion est relativement faible et fortement dépendante de l'excès d'air total. Cette température croît nettement avec l'excès d'air primaire. Dans ces conditions expérimentales, les débits primaires sont tels que la combustion se fait en défaut d'oxygène. Elle est contrôlée par la vitesse de diffusion de l'oxygène au sein de la zone réactive. On observe d'autre part que pour un débit d'air primaire constant, une hausse du débit d'air secondaire (qui engendre un excès d'air secondaire) provoque une très légère baisse de la température de combustion en zone primaire. L'injection de l'air secondaire permet un apport en oxygène en zone secondaire de combustion, ce qui provoque un déplacement de la combustion par convection des produits de dégradation du solide vers la zone secondaire où les températures sont plus élevées.

**\* Excès d'air primaire supérieur ou égal à 1 (et > 1,7) :** la température de combustion au sein de la zone primaire croît encore et se stabilise aux alentours de 950-1050°C. Les températures les plus élevées sont obtenues pour un excès d'air total proche de 2. Notons que dans ce cas de figure, on se rapproche des conditions de fonctionnement des unités industrielles d'incinération. Les débits primaires correspon-

dants permettent un apport en dioxygène au sein du milieu réactif, favorisant les réactions d'oxydation. Ces réactions étant fortement exothermiques, la température du milieu réactionnel augmente. Au delà d'un excès d'air total de 2,1 la concentration en dioxygène est suffisante pour que toutes les réactions d'oxydation des produits de dégradation aient lieu. De plus, à débit primaire constant, une augmentation de l'excès d'air secondaire ne modifie pas la température primaire de combustion.

*ii - Evolution de la température moyenne en zone secondaire de combustion*

L'évolution de la température en zone secondaire de combustion est caractéristique de la combustion des produits issus de la première zone en mélange avec l'air secondaire. La figure 5 représente cette évolution en fonction de l'excès d'air total et ce pour différents excès d'air primaire.

Pour un excès d'air total inférieur à 1,7 la température est très dépendante des débits comburants (primaire ou secondaire). En effet une hausse de débit d'air augmente l'apport en dioxygène qui est en faible concentration dans cette zone. Cette hausse favorise l'oxydation des produits de combustion et donc l'élévation de la température.

Pour un excès d'air total supérieur à 1,7 la température de combustion se stabilise aux alentours de 1000°C. L'influence de l'excès d'air primaire sur la température secondaire est négligeable. Cette température en zone secondaire de combustion ne dépend principalement que de l'excès d'air secondaire.

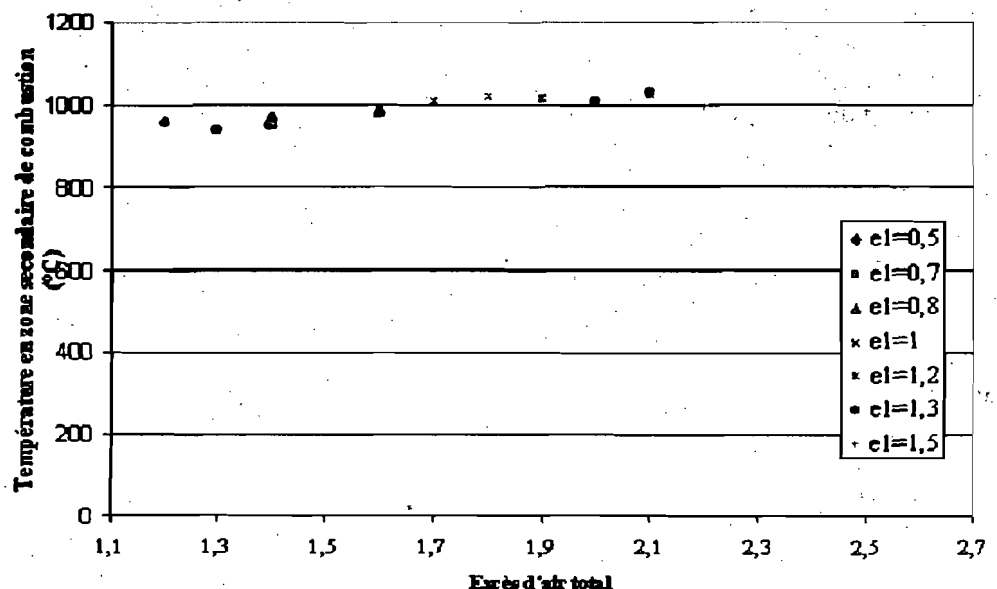


Figure 5 : évolution de la température en zone secondaire de combustion

**4.4. – Evolution de la vitesse de perte de masse**

Les précédents travaux effectués au laboratoire sur l'incinération des ordures ménagères [5], [7], [11] ont montré que la vitesse de perte de masse est fortement dépendante des débits d'air comburants et particu-

lièrement du débit d'air primaire. La figure 6 présente l'évolution de la vitesse de perte de masse en fonction du débit d'air primaire, pour deux débits d'air secondaire différents.

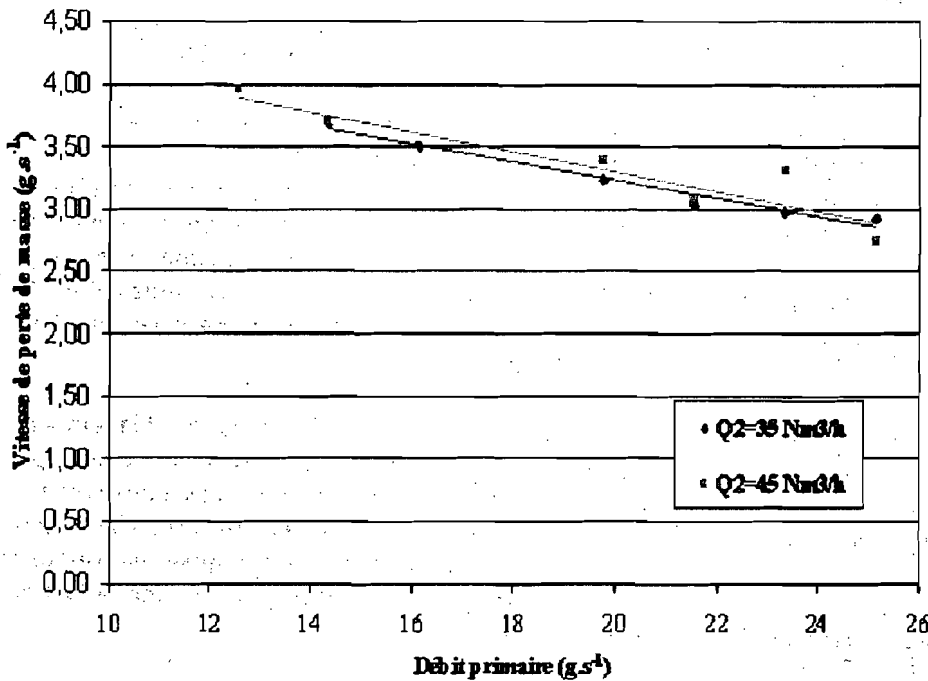


Figure 6 : évolution de la vitesse de perte de masse en fonction du débit d'air primaire

Nous retrouvons ici les tendances dégagées par [7]. La vitesse de perte de masse varie linéairement et de façon décroissante en fonction du débit d'air primaire. L'excès d'air secondaire a peu d'influence sur cette vitesse.

La vitesse de perte de masse est directement liée à la vitesse de dévolatilisation du lit solide. Cette vitesse de dévolatilisation dépend de plusieurs paramètres, notamment de la température du milieu réactif et des échanges thermiques. Certains travaux [10] ont montré que les échanges thermiques de la zone gazeuse de combustion vers le solide se font majoritairement par rayonnement. Ils sont compensés par la convection forcée engendrée par l'injection d'air primaire. Le caractère exothermique d'une combustion plus intense liée à une hausse de la concentration en oxygène (donc des débits comburants) est donc compensé par le refroidissement créé par l'élévation de la vitesse de passage du comburant au sein du lit combustible. Il y a alors réduction de la vitesse de perte de masse en fonction de l'élévation de l'excès d'air primaire.

Le rayonnement constant de la zone secondaire de combustion vers le lit solide est dû à la stabilité des températures au sein de cette zone quel que soit le réglage du débit d'air secondaire. Cela entraîne une très faible influence de l'excès d'air secondaire sur la vitesse de perte de masse.

Le débit primaire contrôle donc la vitesse de perte de masse et la quantité d'oxygène amenée en zone primaire de combustion.

**4.5. – Impact de la composition du mélange expérimental sur les émissions gazeuse**

Les essais réalisés lors de cette étude ont pour but de déterminer les conditions expérimentales permettant une bonne combustion du mélange tout en réduisant la pollution gazeuse par les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone. Le paramètre déterminant est le débit d'air injecté, que ce soit en primaire ou en secondaire.



Pour analyser l'influence des débits comburants testés sur les polluants gazeux émis lors de la combustion, nous exprimons les émissions d'oxyde d'azote et de monoxyde de carbone en milligramme de polluant émis par gramme de combustible brûlé. Cette unité permet d'exprimer avec précision la masse de polluant formée en relation avec la masse de combustible consommée et non en fonction du volume de fumée qui

peut subir des variations dues notamment à la dilution. Pour effectuer ce calcul, il est nécessaire de connaître à chaque instant de la combustion le débit de fumées et la masse de combustible décomposée.

Les conditions opératoires sont décrites dans [9]. Seul le combustible change de nature. C'est pourquoi nous ne présenterons ici que les résultats

4.6. - Evolution de la teneur des gaz de combustion

i - Evolution de la teneur en dioxygène

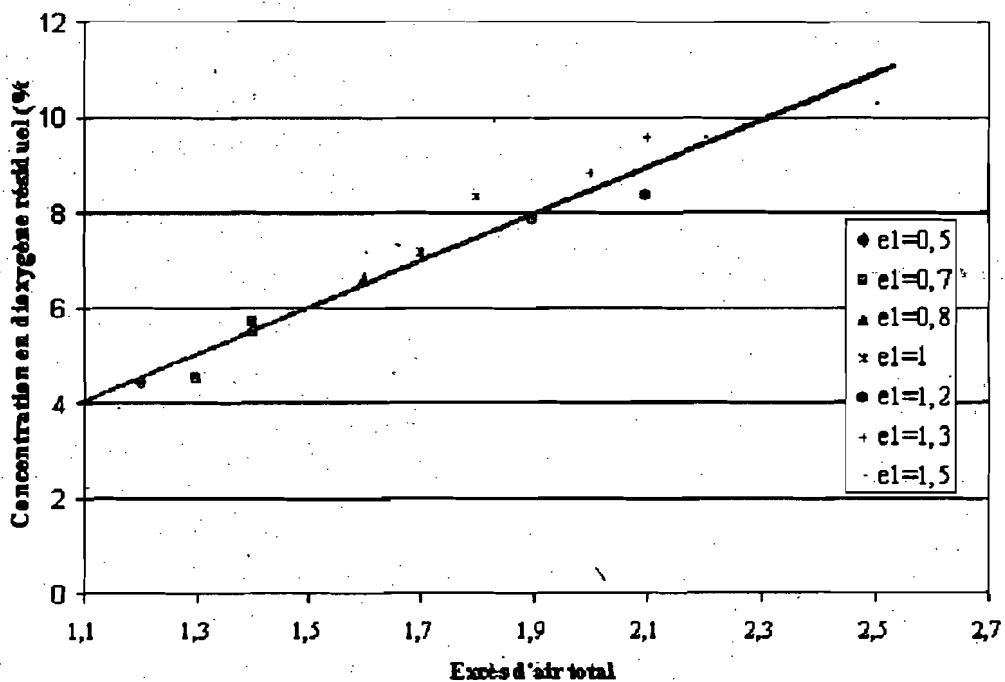
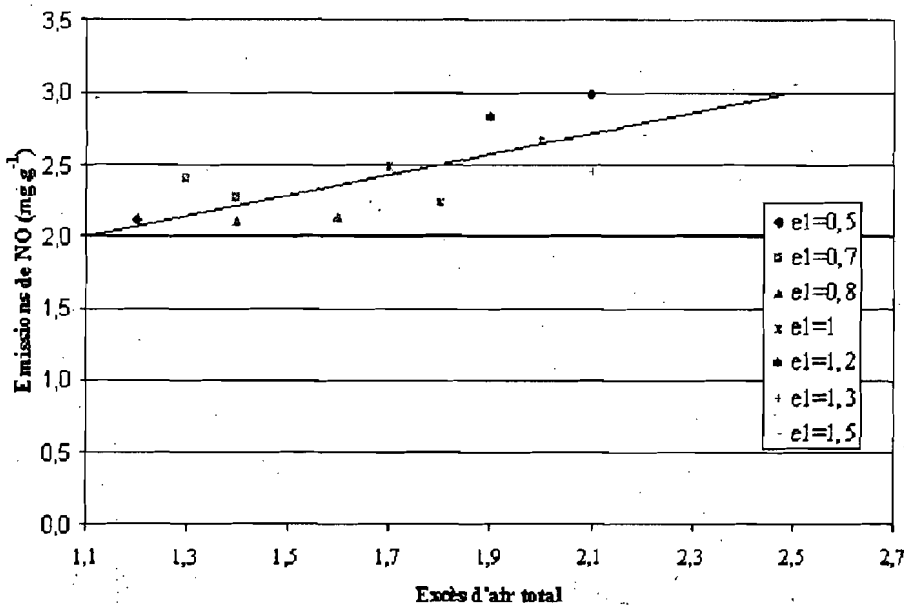


Figure 7 : évolution de la teneur en dioxygène résiduel

La figure 7 présente l'évolution de la concentration en dioxygène résiduel dans les fumées en fonction de l'excès d'air total. Les résultats sont exprimés pour différents excès d'air primaires (e1). On observe qu'une élévation de l'excès d'air total entraîne une hausse de la teneur en dioxygène. Pour un excès d'air primaire constant, la teneur en dioxygène augmente avec le débit d'air secondaire. De même, une augmentation de l'excès d'air primaire entraîne une augmentation de la teneur du dioxygène.

ii - évolution des émissions de monoxyde d'azote (NO)



Les résultats sont exprimés pour différents excès d'air primaire (e1). Les émissions de NO varient entre 2,1 et 3,1 mg.g-1 (figure 8). Elles sont une fonction croissante de l'excès d'air total.

L'évolution des émissions de NO est liée au rendement du mécanisme du «NO du combustible». Celui-ci montre que la formation de cette espèce croît avec la concentration en dioxygène du milieu réactif et avec la température [12].

Figure 8 : évolution des émissions de NO

iii - évolution des émissions de monoxyde de carbone (CO)

La figure 9 présente l'évolution des émissions de CO en fonction de l'excès d'air total pour différents excès d'air primaire (e1). Cette figure permet d'identifier deux zones : l'une pour un excès d'air total inférieur à 1,7 et l'autre pour un excès d'air total supérieur à 1,7.

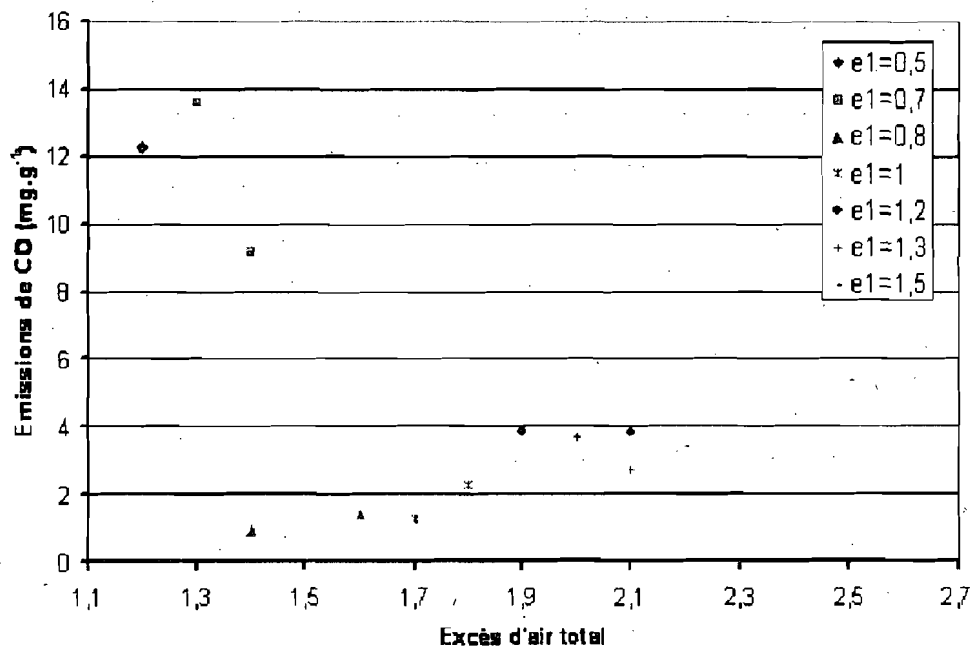


Figure 9 : évolution des émissions de CO

V - DISCUSSION

Le suivi de l'évolution des températures au sein du réacteur à lit fixe à contre courant a permis, pour les conditions expérimentales étudiées, de mettre en évidence les points suivants :

- la température en zone primaire de combustion n'est influencée que par la variation du débit d'air primai-

re ; il est en est de même pour la zone secondaire de combustion et du débit d'air secondaire ;

- le suivi de ces températures en fonction de l'excès d'air total permet d'identifier deux zones selon que cet excès d'air total est inférieur ou supérieur à 1,7 valeur limite correspondant au changement de régime de combustion. Toutefois, pour nos conditions opéra-

toires, une distinction de ces deux zones n'est réellement observée qu'en zone primaire de combustion (figure 4) ;

- pour un excès d'air total inférieur à 1,7 la combustion en zone primaire se fait en défaut d'oxygène, les températures sont faibles, la combustion des produits issus de la dégradation du solide se déplace vers la zone de combustion secondaire où l'injection d'air secondaire favorise leur oxydation. Les températures de combustion dépendent alors de la concentration en dioxygène et de ses conditions de transport ;
- il apparaît nécessaire de maintenir un excès d'air total supérieur à 1,7 pour obtenir une combustion stable. En effet dans ce cas, les débits comburants suffisent à assurer un excès d'air dans l'ensemble du four et donc des températures suffisamment élevées pour assurer la stabilité de la combustion.

Nous avons effectué des essais de combustion avec un déchet modèle représentatif de la fraction combustible des ordures ménagères de Ouagadougou. Le but de cette étude étant d'étudier le comportement de ce mélange en fonction des paramètres de combustion (température, vitesse de perte de masse) ainsi que l'influence des débits comburants sur la formation du monoxyde d'azote et du monoxyde de carbone formés lors de la combustion.

Les températures au sein des différentes zones de combustion dépendent fortement de la concentration et du transport de l'oxygène en zone réactive. L'évolution des températures est différente selon que l'excès d'air primaire est inférieur ou supérieur à 1; pour notre étude ce seuil correspond à un excès d'air total de 1,7. Cette valeur correspond à un changement de régime de combustion. Dans le cas d'excès d'air primaire inférieur à 1, la combustion en zone primaire a lieu en défaut d'oxygène, les produits de dégradation du lit solide ont tendance à se déplacer vers la zone secondaire de combustion où ils sont oxydés au contact de l'air secondaire injecté. La combustion en zone primaire est très influencée par la vitesse de transport du dioxygène, tandis que dans la zone secondaire, elle est contrôlée par la cinétique chimique. Cette évolution des températures a également été observée [7] pour qui le seuil de changement de régime de combustion s'effectue également pour un excès d'air primaire supérieur à 1. La composition du mélange expérimental ne semble pas avoir d'influence sur l'évolution des températures.

Nous avons observé pour nos conditions expérimentales une vitesse de perte de masse supérieure à

celle obtenue par la bibliographie [7]. Nous attribuons cette différence à un changement de porosité au sein du lit solide induit par la différence entre les deux mélanges. Néanmoins, la vitesse de perte de masse varie linéairement et de façon décroissante en fonction de l'excès d'air primaire dans les deux cas ; l'excès d'air secondaire a peu d'influence sur cette vitesse. Cette vitesse de dégradation plus grande dans notre cas aboutit au fait que la concentration en dioxygène résiduel est moins forte pour les faibles excès d'air. En effet, à débit égal, une vitesse de dégradation plus forte entraîne la formation de plus d'espèces volatiles dont l'oxydation en zone primaire consomme plus de dioxygène. Toutefois, les concentrations en dioxygène pour les deux mélanges croissent avec l'augmentation de l'excès d'air total. Pour les forts excès d'air total les teneurs en dioxygène résiduel sont identiques pour les deux mélanges.

Les émissions de monoxyde d'azote sont pour les deux mélanges une fonction croissante et pratiquement linéaire de l'excès d'air total. Comme ces émissions sont fortement dépendantes de la concentration en dioxygène local [12], elles sont dans notre étude légèrement inférieures à faible excès d'air. Cette étude ne permet pas de déceler l'influence de l'excès d'air primaire et de l'excès d'air secondaire séparément. L'évolution du taux de NO ne dépend que de l'excès d'air total.

Les émissions de CO les plus faibles sont obtenues pour un excès d'air primaire de 1 et un excès d'air total de 1,7. En dessous de cette zone, la combustion est difficilement contrôlable. Au delà d'un excès d'air de 1,7, la vitesse de la réaction d'oxydation du CO est ralentie à la fois par la stabilité des températures, le faible temps de séjour des fumées dans la zone de combustion et la concentration du milieu réactionnel en NO.

### CONCLUSION

Malgré ses caractéristiques, les ordures ménagères de Ouagadougou sont incinérables comme le montre nos travaux antérieurs [1]. Il y a été montré que si on sépare les « fines » du reste des déchets, les ordures ménagères de Ouagadougou sont bien situées dans la zone d'incinérabilité des déchets, et que cette zone est assez proche de celle des ordures ménagères d'Europe.

Toutefois, l'incinération de ces ordures ménagères seules n'est pas viable sur le plan industriel. En effet, les usines d'incinération coûtent chères. De plus, l'incinération des déchets est de plus en plus couplée

avec une valorisation énergétique. Cette valorisation énergétique est d'autant plus bénéfique que le combustible de départ a un fort pouvoir calorifique. Dans le cas de Ouagadougou, on peut envisager une combustion d'un mélange ordures ménagères + déchets industriels ou ordures ménagères + déchets d'activités de soin. Cette solution aurait le double avantage d'augmenter considérablement le pouvoir calorifique et une valorisation énergétique serait alors envisageable. Par ailleurs, les risques de contamination dus aux déchets d'activités de soins mélangés aux déchets ménagers dans les dépôts sauvages et dans les décharges actuelles seraient également réduits. Le mode de traitement permettrait également de réduire la quantité de déchets à stocker dans le nouveau centre d'enfouissement technique.

### BIBLIOGRAPHIE

- 1- **TEZABNOU J., KOULIDIATI J., ROAGAUME T., JABOUILLE F., ANDZI BARRHE T., SOUGOTI M., KAFANDO P., SEGDA B.G., GOUDEAU J.C., JOULAIN P.** «Caractérisation expérimentale des ordures ménagères des pays en voie de développement (PED) : cas de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso).» Annales de l'Université de Ouagadougou, série B Vol XVI, 2003.
- 2- **KAFANDO P. ROAGAUME T., SOUGOTI M., JABOUILLE F., KOULIDIATI J., GOUDEAU J.C., BOURCHENIN A.** «Contribution à l'étude de la dégradation thermique de déchets industriels au Burkina Faso : cas des déchets d'emballage» Annales de l'Université de Ouagadougou, série B, Vol IX, 2001.
- 3- **ROGAUMET., JABOUILLE F., SOUGOTI M., KAFANDO P. KOULIDIATI J., AUZANNEAU M., GOUDEAU J.C** «Caractérisation expérimentale de l'émission d'oxyde d'azote dans l'incinération des déchets ménagers en four à grille». Déchets Sciences et Technique, N° 25, pp 2, 11 - 2002.
- 4- **KOULIDIATI J., ROAGAUME T., TEZABNOU J., KAFANDO P., SOUGOTI M., SEGDA B.G., ROAGAUME Y., JABOUILLE F., T., GOUDEAU J.C., JOULAIN P.** «Caractérisation et incidence des oxydes d'azote : des impacts à la réduction» Annales de l'Université de Lomé (soumis) 2003
- 5- **ABBAST., COSTEN P., LOCKWOOD F.C.** «A review of current NOx control methodologies of municipal solid waste combustion process.» 4th European conference on industrial furnaces and boilers, London, 1997.
- 6- **ZHOU X.** Contribution à l'étude de l'incinération des déchets urbains expérimentation en réacteur à lit fixe et à contre courant, approche théorique du déplacement du front d'inflammation. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1994.
- 7- **ROGAUMET.** Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants lors de l'incinération des déchets ménagers. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2001.
- 8- **DESCONNET S., GUENNE O.** Gestion des déchets solides en Afrique Subsaharienne. Manuel de cours à l'intention des élèves ingénieurs, Aspect technique, 1998.
- 9- **TEZANOU J.** Evaluation environnementale et technique de la gestion des déchets ménagers de Ouagadougou. Schéma de gestion et expérimentation de traitement thermique. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2003.
- 10- **ROGAUME Y.** Physico-chimie de la dégradation thermique des molécules azotées : cas du polyamide et du polyuréthane. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1999.
- 11- **JABOUILLE F.** Contribution à l'étude des facteurs d'émission des oxydes d'azote lors de l'incinération des déchets ménagers. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1996.
- 12- **DE SOETE GG.** Mécanisme de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion. Revue générale de thermique N°330-331, pp 353-373 - juin - juillet 1989.