

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INCINERATION DES DECHETS MENAGERS EN FOUR A GRILLES

ROGAUME T.^{*}, JABOUILLE F.^{*}, ANDZI BARHE T.^{*}, TEZANOU J.^{*}
SOUGOTI M.^{**}, KAFANDO P.^{**}, KOULIDIATI J.^{**}

^{*} *Laboratoire de Combustion et de Détonique UPR 9028 CNRS, ENSMA, BP
40109, 86961 FUTUROSCOPE cedex - France.*

^{**} *Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, Université de
Ouagadougou, UFR des Sciences exactes et appliquées, Département de Physique,
03 BP 7021 Ouagadougou 03 - Burkina Faso.*

(Reçu le 4/12/2002 - Accepté le 05/05/2003)

Summary : The characterization of the municipal solid wastes of the city of Ouagadougou, done from january to april 2001 reveal that incineration should be a good way of treatment, notably due to the respectable PCI of those wastes during the dry season.

A preliminary study has been conducted with a combustible mixture representative of the municipal solid waste of Poitiers. This one is composed of wood, cardboard and two kinds of plastic : PET and polyamide. The study has been performed into the « Laboratoire de Combustion et de Détonique » into poitiers using a counter flow fixed bed reactor.

The work focussed on the influence of the excess air of combustion on the emissions of NO and CO and particularly on the repartition of the air between the primary and the secondary injection. The results obtained demonstrate that the NO emissions increase with the total excess air than the CO emissions first decrease before to increase. Thus the experimental conditions permitting a reduction of the CO and the NO emissions are obtained for a primary excess air between 1 and 1.1 and a secondary one between 0.7 and 0.8.

The study will continue into the « Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement » (LPCE) at the University of Ouagadougou concerning a waste characteristic of those of Ouagadougou. In this aim an experimental device has been developed and built

Keywords : Incineration, Municipal solid wastes, excess air, NO

* Auteur de correspondance

I - INTRODUCTION

Face à l'importance du gisement de déchets, leur gestion est devenue un problème environnemental très important. Nombre de procédés de traitement et d'élimination peuvent être mis en œuvre. Parmi eux, les traitements thermiques constituent des moyens fiables et aisés de réduction de la taille et du volume des déchets, notamment par l'incinération. Celle-ci peut, de plus, permettre une récupération d'énergie. Néanmoins, elle est génératrice de pollution, notamment gazeuse avec émissions d'oxydes de carbone, de soufre, d'azote, de produits chlorés (dioxines et furanes), de composés organiques volatils, d'hydrocarbures polycycliques aromatiques, de poussières...

Parmi les espèces gazeuses émises, les oxydes d'azote posent un certain nombre de problèmes à notre environnement : ils sont en partie responsables de la destruction de la couche d'ozone, de la formation de brouillards oxydants et de pluies acides. Ils font l'objet d'études depuis un certain nombre d'années au sein du Laboratoire de Combustion et de Détonique, plus particulièrement orientées vers les mécanismes de formation et de destruction. Le détail des impacts des oxydes d'azote et de leurs mécanismes de formation a été préalablement réalisé par ROGAUME Y. et collaborateurs ^[1]

La présente étude vise à mieux connaître les processus de combustion mis en jeu et les mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote. Elle a pour principale finalité de déterminer l'efficacité de certaines techniques primaires de réduction des émissions d'oxydes d'azote.

Le dispositif expérimental utilisé est un réacteur à lit fixe à contre courant. Il simule le processus de combustion d'une tranche de combustible au sein d'un four à grilles. Dans la continuité des travaux de ZHOU ^[2] et de JABOUILLE^[3], un déchet modèle à base de bois, de carton et de plastiques est utilisé.

La description des différentes techniques primaires de réduction des oxydes d'azote montre l'importance des conditions de richesse dans la chambre de combustion. En effet, DE SOETE ^[4] et MILLER & BOWMAN ^[5] ont noté, au cours de leurs travaux sur la combustion du charbon, l'importance de la concentration en dioxygène et de la température sur la conversion de l'azote constitutif du combustible en NO. Une série d'expériences a ainsi été réalisée sur le déchet modèle à l'aide du réacteur à lit fixe à contre courant afin d'étudier dans une large gamme l'influence des excès d'air sur les mécanismes de combustion et sur la formation des oxydes d'azote et du monoxyde de carbone.

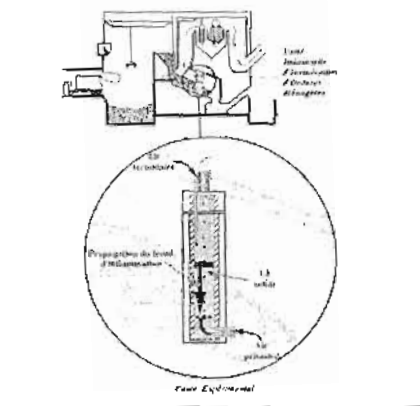
II – PARTIE EXPERIMENTALE

2.1 – Description du dispositif expérimental

Le réacteur à lit fixe à contre courant permet l'étude de la combustion d'une tranche verticale de déchets lors de son déplacement le long des grilles au cours du temps. Pour ce faire, l'allumage se fait par le haut et le front d'inflammation se propage au sein du lit solide dans le sens descendant. Inversement, l'air primaire est injecté à la base du combustible et se propage dans le sens ascendant. Ce dispositif permet l'étude de la vitesse de propagation du front d'inflammation, du transfert de chaleur et de la formation des espèces gazeuses.

La figure 1 illustre la corrélation entre un four industriel à grilles et le réacteur à lit fixe à contre courant.

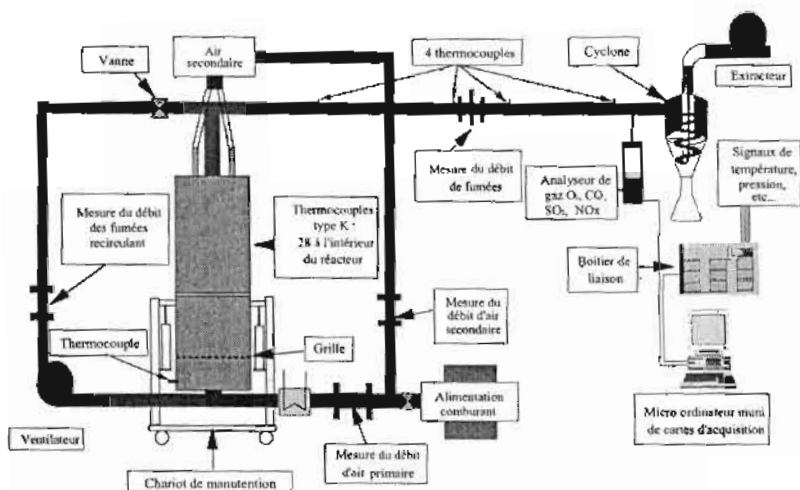
FIGURE 1 : du four à grille au réacteur à lit fixe à contre courant.



Les températures dans le solide et dans la chambre de combustion en phase gazeuse, la pression partielle des principaux effluents gazeux dans les fumées, les températures et débits de comburant sont mesurés en continu. Le dispositif expérimental comporte 7 éléments principaux :

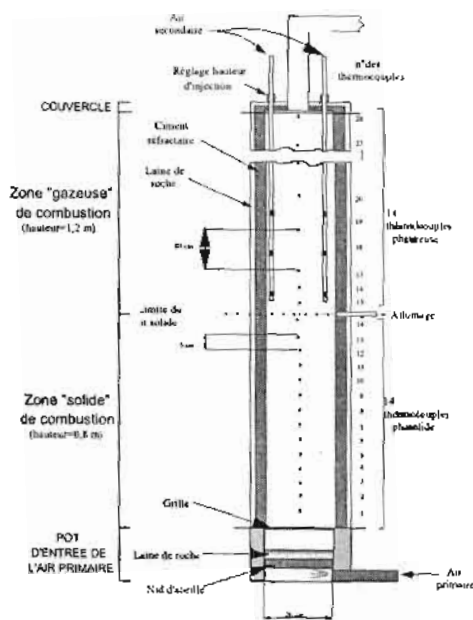
- le réacteur à lit fixe proprement dit ;
 - le dispositif d'alimentation, de mesure et de préchauffage du comburant ;
 - le conduit d'évacuation des fumées ;
 - l'analyseur de gaz à cellules électrochimiques ;
 - le système de piégeage des cendres volantes et d'extraction des fumées ;
 - la boucle de recirculation des fumées ;
 - le système d'acquisition et de traitement des résultats.
- Une illustration du dispositif est présentée figure 2 :

FIGURE 2 : vue d'ensemble du réacteur à lit fixe à contre courant



Le réacteur dont une coupe schématique est présentée sur la figure 3 est un cylindre de 2 mètres de haut dont le diamètre intérieur est de 0,2 m. Il est constitué d'éléments en inox isolés thermiquement et dont la paroi interne est en ciment réfractaire, ce qui permet de reproduire fidèlement les parois d'un four d'incinération industriel.

FIGURE 3 : *présentation du réacteur à lit fixe à contre courant*



La partie recevant le combustible solide est haute de 0,8 m. La zone de combustion en phase gazeuse a une hauteur de 1,2 m. Le réacteur est équipé de 28 thermocouples de type K (chromel-alumel) disposés le long de l'axe du réacteur. Ils sont distants de 50 mm dans la partie « solide » et de 100 mm au sein de la zone de combustion en phase homogène (exceptés les trois premiers (n°15, 16 et 17) distants de 50 mm).

Le réacteur dispose à sa base d'un compartiment d'injection d'air primaire.

Au sommet du réacteur, un couvercle équipé de deux passages permet l'injection de l'air secondaire et assure la liaison avec le conduit d'évacuation des fumées. L'injection est effectuée au moyen de deux canes identiques à trois orifices d'injection chacune.

Le réglage du débit d'injection que ce soit en air primaire ou en air secondaire est réalisé à l'aide d'une électronique de commande reliée à deux débitmètres massiques.

L'analyse des gaz de combustion est effectuée en continu à l'aide d'un analyseur TESTO 350 fonctionnant avec des cellules électrochimiques. Il mesure les quantités de CO, NO, NO₂, SO₂ et O₂ et calcule les taux de CO₂ en fonction de l'oxygène et du type de combustible.

A l'extrémité du conduit de fumées, un extracteur de forte puissance permet de maintenir une très légère dépression dans tout le dispositif expérimental. Ainsi, la combustion au sein du réacteur n'est jamais perturbée par une surpression. Cet extracteur est couplé au cyclone qui permet de récupérer les cendres volantes et les poussières entraînées par les fumées.

L'ensemble des signaux provenant des multiples capteurs (température, débits, analyse des gaz) converge vers un micro ordinateur pour le stockage des données.

Une acquisition est réalisée toutes les cinq secondes durant tout le cycle de combustion.

2.2 - Description du combustible

Le 'déchet modèle' utilisé lors de nos expériences a la composition suivante :

- 41 % de bois ;
- 37 % de carton ;
- 19 % de polyéthylène téréphtalate ;

- 3 % de polyamide.

Les pourcentages de répartition entre les constituants ont été calculés à partir de la composition des déchets ménagers. Pour cela, outre l'utilisation des combustibles sous leurs formes standards (bois, cartons, plastiques), les hypothèses suivantes ont été faites, afin de prendre en compte l'ensemble des composants combustibles des ordures ménagères : les complexes et textiles ont une nature qui se rapproche de celle du plastique ; les combustibles non classés ont une structure relativement proche de celle du bois. Dans le cadre de notre étude, l'influence de l'humidité et des inertes sur le processus de combustion n'a pas été abordée. En effet, des travaux précédents ont montré que ces facteurs n'avaient que peu d'influence sur les mécanismes de formation des oxydes d'azote, JABOUILLE^[3] et MASSIOT^[6].

Une analyse élémentaire de chaque composant du mélange combustible a été effectuée afin de caractériser avec précision notre combustible et de pouvoir mener des bilans matières. Pour cela des échantillons de chaque composant ont été analysés pour le dosage des éléments C, H, O, N, S. Le tableau I fait le bilan des compositions massiques (en pourcentage) de chaque composant :

TABLEAU I : composition élémentaire des composés du mélange expérimental

Eléments	Bois	Carton	PET	Polyamide
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 %	12,0 %
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 calculée et comparée à celle des déchets ménagers :

TABLEAU II : compositions élémentaires du mélange expérimental et des déchets ménagers

Eléments	Mélange expérimental	Ordures ménagères
Carbone (C)	47,8 %	52 %
Hydrogène (H)	5,6 %	8 %
Oxygène (O)	41,7 %	38 %
Azote (N)	0,53 %	0,5 %
Soufre (S)	0,25 %	0,3 %

On remarque que la composition chimique du déchet modèle utilisé lors de notre étude est très proche de celle des ordures ménagères. Il permet donc de se substituer avec précision à celles-ci.

2.3 - Conditions opératoires

Lors de l'incinération des déchets ménagers, la combustion se fait dans des conditions pauvres, donc en excès d'air. Nous exprimerons donc les résultats en fonction de l'excès d'air engendré par chaque débit comburant. L'excès d'air 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. Le tableau III présente l'excès d'air correspondant à chaque condition expérimentale testée. Les différents débits sont présentés en $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Q_1 est le débit d'air primaire et engendre un excès d'air primaire e_1 . Q_2 est le débit secondaire et engendre l'excès d'air secondaire e_2 . Q_t qui est le débit total, définit l'excès d'air total e_t :

TABLEAU III : *définition des conditions expérimentales*

Q_1	35	35	40	40	40	45	45	45	50
Q_2	35	45	35	40	45	35	40	45	35
Q_3	70	80	75	80	85	80	85	90	85
e_1	0,6	0,6	0,75	0,75	0,75	0,8	0,8	0,8	1
e_2	0,6	0,8	0,65	0,75	0,85	0,6	0,7	0,8	0,7
e_3	1,2	1,4	1,4	1,5	1,6	1,4	1,5	1,6	1,7

Q_1	50	50	55	55	55	55	60	60	60
Q_2	40	45	25	35	40	45	35	40	45
Q_3	90	95	80	90	95	100	95	100	105
e_1	1	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,3	1,3
e_2	0,8	0,9	0,5	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1
e_3	1,8	1,9	1,6	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3

Q_1	65	65	65	75	75	85	85	95	95
Q_2	35	40	45	35	45	35	45	35	45
Q_3	100	105	110	110	120	120	130	130	140
e_1	1,4	1,4	1,4	1,8	1,8	2,1	2,1	2,5	2,5
e_2	0,8	0,9	1	0,8	1	0,9	1	0,9	1,2
e_3	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	3	3,1	3,4	3,7

Les conditions expérimentales testées ont permis d'étudier un excès d'air total compris entre 1,2 et 3,7. L'excès d'air primaire a varié dans une gamme allant de 0,6 à 2,5 et l'excès d'air secondaire entre 0,5 et 1,2.

Afin d'en faciliter l'exploitation et l'extrapolation sur d'autres unités expérimentales, les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants en fonction de l'excès d'air ainsi défini.

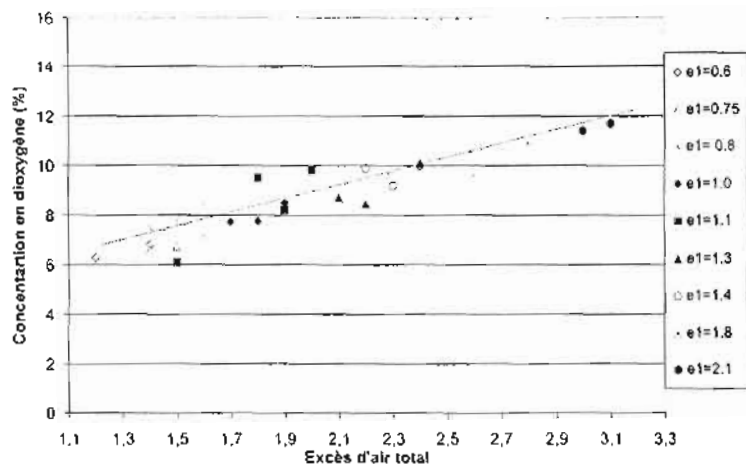
III - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Afin d'évaluer avec objectivité l'influence de chaque paramètre expérimental et plus particulièrement celle des débits d'air primaire et secondaire, les valeurs des émissions de CO et de NO sont exprimées en milligramme de polluant émis par gramme de combustible brûlé.

3.1 - Evolution des teneurs en dioxygène

Les études menées par le passé ont montré que les émissions de NO sont fortement dépendantes de la concentration en dioxygène du milieu réactif, DE SOETE ^[4]. De même, les différents travaux de YETTER et al. ^[7,8] montrent que la vitesse d'oxydation du CO est influencée par la teneur en dioxygène. Ainsi, il est nécessaire de vérifier l'évolution de la teneur en dioxygène résiduel dans les fumées en fonction de l'excès d'air total, figure 4. Les résultats sont exprimés pour différents excès d'air primaire (e_1) :

FIGURE 4 : évolution de la teneur en dioxygène en fonction de l'excès d'air total

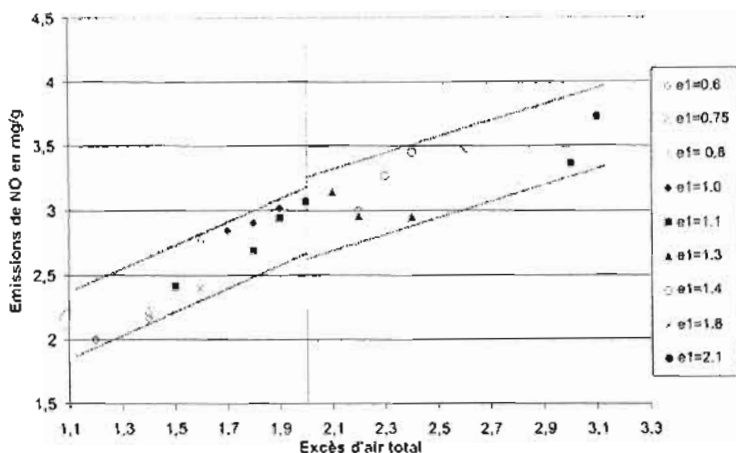


De manière générale, la teneur en dioxygène varie de façon prévisible : une élévation de l'excès d'air total entraîne une hausse de la concentration en dioxygène. De plus, à excès d'air total constant, on constate qu'une hausse du débit d'air primaire s'accompagne d'une hausse du taux de dioxygène. De même, pour un excès d'air primaire constant, la teneur en oxygène croît avec le débit secondaire.

3.2 - Evolution des émissions de monoxyde d'azote :

La figure 5 présente l'évolution des émissions de NO, qui est le seul oxyde d'azote émis dans nos conditions, en fonction de l'excès d'air total. Les résultats sont exprimés pour différents excès d'air primaire (e_1) :

FIGURE 5 : influence de l'excès d'air total sur les émissions de NO



D'une manière générale, on constate que les émissions de NO varient entre 2 et 3,5 mg.g⁻¹. Les émissions de NO sont une fonction croissante de l'excès d'air total. Néanmoins l'évolution des teneurs en NO peut être divisée en deux zones distinctes selon l'excès d'air total.

3.2.1 - Excès d'air total inférieur à 2 :

Lorsque l'excès d'air total est inférieur à 2, la teneur en dioxygène résiduel est inférieure à 8 %. La croissance des émissions de NO avec l'excès d'air total est forte. Toutefois, pour un excès d'air total constant, les émissions de NO sont très proches les unes des autres et ce, quelle que soit la répartition (excès d'air primaire / excès d'air secondaire). Pour ces conditions, l'excès d'air primaire est inférieur ou égal à 1,1. A excès d'air total constant, les émissions de NO diminuent lorsque l'excès d'air primaire augmente. Une hausse du débit primaire engendre un apport d'oxygène au sein de la zone primaire de combustion. L'oxydation des intermédiaires azotés va alors être plus importante. Le NO va être formé très rapidement et sera

réduit par réaction avec les produits de réactions incomplètes (hydrocarbures et surtout espèces azotées de type NH_x).

On constate, pour chaque excès d'air primaire, qu'une hausse du débit secondaire entraîne une augmentation des émissions de NO. En effet, l'excès d'air primaire est faible et la concentration en dioxygène au sein de la zone primaire de combustion est proche de zéro. L'oxydation en zone primaire des intermédiaires azotés tels que le HCN, le NH_3 et le HNCO n'est pas complète et va prendre place au sein de la zone secondaire de combustion (où l'air secondaire est injecté) pour former du NO. L'apport d'air secondaire va alors permettre de compléter la combustion. Le paramètre limitant de la formation du monoxyde d'azote est ainsi la diffusion de l'oxygène : plus le débit d'air secondaire est important et plus l'apport en dioxygène sera grand et plus la turbulence au sein du four sera importante, ce qui favorise l'oxydation des composés azotés pour former du NO.

3.2.2 - Excès d'air total supérieur à 2 :

Lorsque l'excès d'air total est supérieur à 2, la croissance des émissions de NO devient plus faible. Pour ces débits comburants, la teneur en dioxygène résiduel est comprise entre 8 et 12 %. L'excès d'air primaire a alors une grande influence sur les émissions de NO qui augmentent avec ce paramètre. Dans ces conditions, l'excès d'air primaire est supérieur ou égal à 1.3 et la combustion prend place en excès d'oxygène quelles que soient les zones de combustion au sein du réacteur à lit fixe. Pour des conditions de combustion similaires, DE SOETE^[4] montre que les émissions de NO sont fortement dépendantes de la richesse locale en dioxygène. Ainsi une hausse du débit primaire permet un apport en dioxygène qui favorise la formation de NO. L'influence de l'air secondaire sur les teneurs en monoxyde d'azote est plus complexe à interpréter. En effet pour un

excès d'air primaire de 1,4 et de 2,1 l'augmentation du débit secondaire génère une hausse des émissions de NO. Inversement pour des excès d'air primaire de 1,3 et de 1,8 les émissions de NO vont décroître avec l'air secondaire. Cette évolution est liée au rendement du mécanisme du NO du combustible qui montre que la formation de cette espèce croît avec la température, DE SOETE^[4]. Pour ces conditions, les débits comburants sont tels que la concentration en oxygène est suffisante dans toutes les parties du four pour garantir une combustion complète. Ces débits favorisent alors une forte turbulence au sein du four et le temps de transport des espèces chimiques et de l'oxygène va être négligeable devant le temps des réactions chimiques. Ainsi la formation et la réduction du NO va dépendre de la cinétique chimique, qui est influencée par les températures et les temps de séjour.

Bilan :

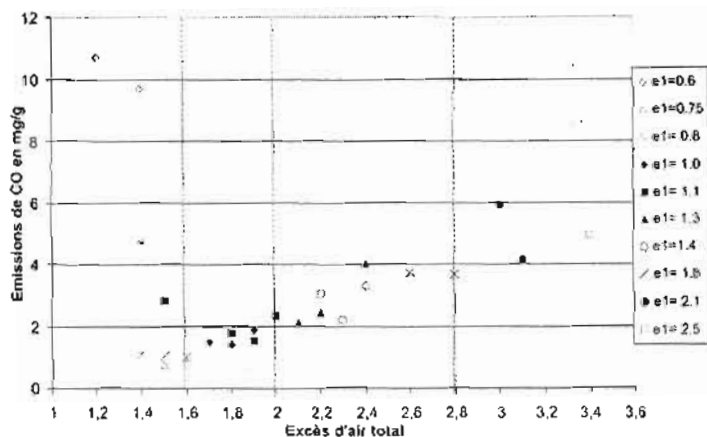
Le bilan du comportement du NO en fonction des excès d'air montre que plus les excès d'air primaire et secondaire vont être faibles et plus les teneurs en NO vont être faibles. Ainsi il est possible de déterminer les conditions expérimentales permettant de limiter les émissions d'oxyde d'azote : un excès d'air primaire compris entre 0,6 et 1,1 correspondant à un débit primaire entre 35 et 55 Nm³.h⁻¹ et un excès d'air secondaire compris entre 0,6 et 0,8 à un débit secondaire compris entre 35 et 40 Nm³.h⁻¹.

3.3. Emissions de monoxyde de carbone

L'étude de l'influence des débits d'air sur les émissions de NO a permis la détermination des conditions garantissant un minimum d'émissions. Néanmoins la réduction des émissions de NO ne doit pas favoriser la formation d'autres composés polluants. En effet l'évolution des émissions de CO et de NO ont des tendances inverses en fonction

des débits comburants. Ceci a été vérifié par ROGAUME Y. ¹⁹¹ lors de l'incinération de certains déchets industriels. Ainsi, nous avons étudié l'influence des débits d'air sur la formation du CO. L'évolution des teneurs en CO en fonction de l'excès d'air total est présentée figure 6. Les évolutions sont présentées pour différents excès d'air primaire (e_1) :

FIGURE 6 : *évolution des émissions de CO en fonction de l'excès d'air total*



L'étude du comportement des émissions de CO permet d'identifier quatre zones distinctes en fonction de l'excès d'air total.

3.3.2 - Excès d'air total inférieur à 1,6 :

Un excès d'air total supérieur à 1,6 est nécessaire à l'obtention d'une évolution relativement stable des émissions de CO. En dessous de cette valeur, la combustion entraîne de fortes variations des émissions de CO en fonction des excès d'air. Les émissions de CO sont alors conséquentes. Néanmoins, il est important de remarquer que

les émissions les plus faibles sont obtenues pour un excès d'air total compris entre 1,5 et 1,6 avec un excès d'air primaire de 0,75 et 0,8.

Dans le cas de faibles excès d'air, la teneur en oxygène résiduel est inférieure à 8% et est insuffisante pour que l'oxydation du CO en CO₂ soit complète, ce qui est en accord avec la littérature. En effet, cette oxydation est réalisée par réaction avec le radical O[•] et principalement avec le radical OH[•] ($\text{CO} + \text{OH}^{\bullet} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}^{\bullet}$) qui proviennent des réactions de dissociation de l'eau ($\text{O}^{\bullet} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^{\bullet} + \text{OH}^{\bullet}$) et de l'oxygène ($\text{H}^{\bullet} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^{\bullet} + \text{OH}^{\bullet}$). Or, dans ces conditions expérimentales, l'excès d'air est inférieur à 1. Dans ce cas, la concentration en radical hydroxy est un paramètre prédominant de la vitesse d'oxydation du CO, YETTER & al.^[7,8]. Or, la vitesse de la réaction d'oxydation du CO par le radical hydroxy est plus faible que les vitesses d'oxydation des hydrocarbures. On peut alors conclure que la présence d'hydrocarbures va inhiber l'oxydation du CO, puisque ceux ci vont être prioritairement oxydés au détriment du CO, GLASSMAN^[10]. La conversion du CO en CO₂ est ainsi retardée jusqu'à ce que les produits de combustion et principalement les hydrocarbures soient consommés, WESTBROOK & DRYER^[11]. Ce constat vient renforcer le fait que pour un excès d'air primaire inférieur à 1 (ce qui se traduit ici par un excès d'air total inférieur à 1,6) la combustion est déplacée par convection de la zone primaire vers la zone secondaire de combustion. L'injection d'air secondaire permet de compléter l'oxydation des hydrocarbures pour former du CO qui n'a pas le temps d'être oxydé en CO₂.

Une élévation des débits comburants permet un apport en oxygène qui favorise la formation de radicaux propices à l'oxydation du CO. De plus, la vitesse de la réaction $\text{CO} + \text{OH}^{\bullet} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}^{\bullet}$ devient une fonction croissante de façon exponentielle de la température à partir de 850°C, GLASSMAN^[10]. L'évolution des températures de combustion montre que, pour un excès d'air total inférieur à 1,6, les

températures sont relativement faibles que ce soit dans la zone primaire ou secondaire de combustion. Une hausse de l'excès d'air primaire ou de l'excès d'air secondaire entraîne une augmentation de la concentration en oxygène ainsi qu'une élévation de la température et favorise ainsi l'oxydation du CO dont les teneurs diminuent.

La formation du CO va donc être limitée par les phénomènes de transport.

3.3.2 - Excès d'air total compris entre 1,6 et 2 :

Les émissions de CO deviennent alors une fonction croissante de l'excès d'air total. Néanmoins, pour un excès d'air total compris entre 1,6 et 2, les émissions sont relativement stables et inférieures à 2 mg.g⁻¹. Dans ce cas, on constate qu'une variation de l'excès d'air secondaire et de l'excès d'air primaire n'a que peu d'influence sur les émissions de CO.

L'excès d'air primaire est alors compris entre 1 et 1,1 et permet de garantir une combustion en zone primaire avec suffisamment d'oxygène pour que l'oxydation des hydrocarbures soit complète. Le CO ainsi formé va alors être oxydé en CO₂ grâce à l'injection d'air secondaire.

3.3.3 - Excès d'air total compris entre 2 et 2,8 :

Une élévation de l'excès d'air primaire entraîne alors une hausse des émissions de CO. Cette évolution est dans un premier temps contraire à nos attentes compte tenu de certains résultats rencontrés dans la littérature. En effet, un accroissement de l'excès d'air induit une hausse de la concentration en dioxygène et en radicaux O[•] et OH[•], permettant l'oxydation du CO en CO₂. Le comportement des émissions de CO s'explique alors pour diverses raisons :

- Dans ces conditions expérimentales, la combustion au sein du réacteur à lit fixe à contre courant se fait en conditions pauvres,

quelles que soient les zones, puisque les teneurs en dioxygène résiduel dans les fumées sont comprises entre 8 et 10,5 % et que l'excès d'air primaire est supérieur à 1. YETTER & al.^[17] montrent que dans ces conditions la vitesse d'oxydation du CO est constante quelle que soit la concentration en dioxygène et en radicaux hydroxydes dont les concentrations sont suffisantes pour que l'oxydation des hydrocarbures et du CO ait lieu.

- L'étude préalable de l'influence des excès d'air montre que les températures de combustion sont relativement stables pour un excès d'air total compris entre 1,6 et 2,8. La vitesse d'oxydation du CO est donc relativement constante en fonction de la température. DRYER & GLASSMAN [12] démontrent même que sous certaines conditions, la vitesse de la réaction $\text{CO} + \text{OH}^\circ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}^\circ$ peut être diminuée pour une température supérieure à 1000°C.

- L'augmentation des débits comburants engendre une diminution du temps de séjour des gaz de combustion et donc du CO dans les zones de haute température où prennent place les réactions d'oxydation. En effet, une augmentation de l'excès d'air (provenant d'une augmentation des débits comburants) entraîne des vitesses d'écoulement plus importantes dans le réacteur. Plus l'excès d'air est grand et plus le temps de séjour va être court donc la teneur en CO forte, YETTER & al.^[13].

- GLARBORG & al.^[14] et ROESLER & al.^[15] montrent que la présence de NO engendre une réduction de la vitesse d'oxydation du CO. Or, les émissions de NO augmentent avec les débits comburants. Une hausse des excès d'air va ainsi ralentir les vitesses d'oxydation du CO dont les teneurs vont croître.

L'influence de l'air secondaire est difficile à expliciter. En effet, pour des débits secondaires compris entre 35 à 40 Nm³.h⁻¹, l'augmentation du débit d'air entraîne une baisse des émissions de CO alors que pour des débits de 40 à 45 Nm³.h⁻¹, une augmentation de la

teneur en CO est observée. Les tendances obtenues sont alors similaires à celles décrites par KRAKT & al. ¹⁶¹ lors de leurs travaux sur l'influence de la turbulence sur l'oxydation du CO humide. En effet, ils montrent que, dans le cas de fortes turbulence, l'oxydation du CO est dans un premier temps favorisée puis dans un second temps inhibée par l'augmentation de la turbulence.

3.3.4 - Excès d'air total supérieur à 2,8 :

Au-delà d'un excès d'air total de 2,8, les émissions de CO sont importantes, supérieures à 4 mg.g^{-1} . Ces fortes émissions sont dues à la réduction des températures de combustion et des temps de séjour des gaz au sein des zones propices à la réduction du CO. La vitesse d'oxydation du CO en CO₂ est alors plus faible.

Bilan :

A partir de la description de l'influence des excès d'air sur la formation du CO, il est possible de déterminer les conditions opératoires qui permettent de minimiser les émissions de CO.

Les émissions de CO les plus faibles sont obtenues pour un excès d'air primaire proche de 0,75 à 0,8 et un excès d'air secondaire compris entre 0,75 et 0,85. Toutefois, on note qu'un excès d'air total supérieur à 1,6 est nécessaire à l'obtention d'émissions relativement stables. Ainsi, les conditions permettant de garantir des émissions de CO faibles et stables correspondent à un excès d'air total compris entre 1,7 et 2. Ainsi un excès d'air primaire de 1 et de 1,1 correspondant à un débit primaire compris entre 50 et 55 $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ avec un excès d'air secondaire variant de 0,7 à 0,9 correspondant à un débit secondaire compris entre 35 et 45 $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ apparaissent comme les meilleures conditions expérimentales.

Lorsque l'excès d'air total est supérieur à 2, les phénomènes de transport sont extrêmement rapides et la réduction du CO est

dépendante des vitesses des réactions chimiques. Celles ci sont alors influencées par la concentration en NO et le temps de séjour des gaz dans les zones de fortes températures où prennent place les réactions d'oxydation et de réduction du CO.

IV - CONCLUSION

On constate que les performances thermiques du réacteur (températures et vitesse de perte de masse du combustible) dépendent fortement de la concentration et de la diffusion de l'oxygène. Deux cas apparaissent selon que l'excès d'air primaire est inférieur ou supérieur à 1, correspondant pour notre étude à un excès d'air total de 1,6. Cette valeur particulière correspond à un changement de régime de combustion.

Dans le cas d'excès d'air primaire inférieurs à 1, les températures de combustion sont plus faibles. La combustion en zone primaire a lieu en défaut d'oxygène. La combustion des produits de pyrolyse se déplace vers la zone secondaire de combustion où l'injection d'air secondaire permet l'oxydation de ces produits. La combustion en zone primaire est alors fortement dépendante de la vitesse de diffusion de l'oxygène, tandis qu'au niveau de la zone secondaire, la combustion est contrôlée par la cinétique chimique. Cette combustion entraîne alors les plus faibles émissions de NO mais engendre de fortes émissions de CO.

Afin d'obtenir une combustion stable avec des températures élevées, il est important d'avoir un excès d'air primaire supérieur à 1. La vitesse de dévolatilisation du combustible est alors rapide. Dans ce cas, les débits permettent de maintenir une combustion en excès d'air dans l'ensemble du four. Pour ces conditions expérimentales, la combustion est dépendante des régimes cinétiques. Les émissions de

NO augmentent alors avec les excès d'air, tandis que les émissions de CO passent par un minimum avant de croître elles aussi.

Néanmoins, on note que l'excès d'air total ne doit pas dépasser 2,8 sous peine de diminuer la température de combustion par des vitesses d'injection du comburant trop élevées.

A partir de tous ces éléments, il est possible de déterminer les conditions expérimentales conduisant à la limitation des émissions d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone lors de l'incinération des déchets ménagers. Il apparaît alors qu'un excès d'air primaire compris entre 1 et 1,1 correspondant à un débit primaire de 50 à 55 Nm³.h⁻¹ avec un excès d'air secondaire variant de 0,7 à 0,8 ce qui correspond à un débit secondaire compris entre 35 et 40 Nm³.h⁻¹ permettent l'obtention de faibles émissions de CO et de NOx.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - ROGAUME T., J. KOULIDIATI, Y. ROGAUME, F. JABOUILLE, C. AGBANGLA, J.C. GOUDEAU. 5^e Journées Annuelles de la S.O.A.CHIM. *Université Abdou Moumouni de Niamey. 2-9 août 1999, Niamey, République du NIGER.*
- [2] - ZHOU X. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1994.
- [3] - JABOUILLE F. Contribution à l'étude des facteurs d'émissions des oxydes d'azote lors de l'incinération de déchets ménagers, Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, 1996.
- [4] - DE SOETE G. G. *Revue Générale de Thermique*, 1989, n° 330-331, pp. 353-373, juin-juillet.
- [5] - MILLER J.A. & BOWMAN C.T. *Progress Energy Combustion Science*, 1989, vol. 15, pp. 287-338.
- [6] - MASSIOT C. Contribution à l'étude de l'incinération des déchets ménagers contenant des matières inertes, rapport de stage IUT, 1997.

- [7] - YETTER R.A., DRYER F.L., RABITZ H. Combustion Science and Technology, (1991), vol. 79, pp. 97-128.
- [8] - YETTER R.A., DRYER F.L., RABITZ H. Combustion Science and Technology,(1991), vol. 79, pp. 129-140.
- [9] - 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, 1998.
- [10] - GLASSMAN I. Combustion, Third edition, Academic Press, 1996.
- [11] - WESTBROOK C.K. & DRYER F.L. Progress Energy Combustion Science, (1984), vol. 10, pp. 1-58.
- [12] - DRYER F.L. & GLASSMAN I. 14th international symposium on combustion, the combustion institute, (1973), pp 987-1003.
- [13] - YETTER R.A., DRYER F.L., RABITZ H. 21st international symposium on combustion, the combustion institute, (1986), pp. 749-760.
- [14] - GLARBORG P., KUBEL D., KRISTENSEN P.G. HANSEN J., DAM-JOHANSEN K. Combustion Science and Technology, (1995), vol. 110-111, pp 461-485.
- [15] - ROESLER J. F., YETTER R. A., DRYER F. L. Combustion and flame, (1995), vol. 100 pp 495-504.
- [16] - KRAFT M., STOECKELMANN E., BOCKHORN H., 26th international symposium on combustion, the combustion institute (1996), pp. 807-81