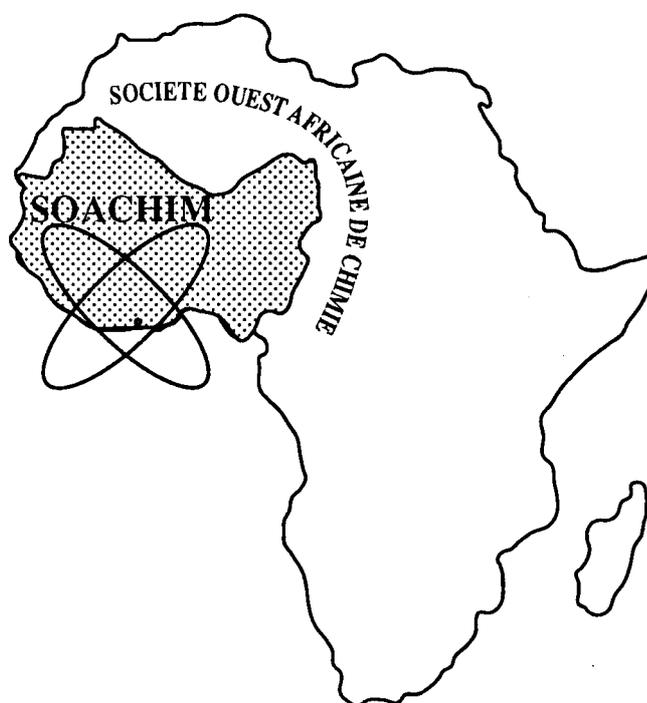


# Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

*J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*  
Code Chemical Abstracts : JSOCF2  
Cote INIST (CNRS France) : <27680>

ISSN 0796-6687

17<sup>ème</sup> Année, Décembre 2012, N° 034



Site Web: <http://www.soachim.org>

## **Modélisation de la combustion d'un mélange de matériaux cellulosique et plastique dans un four de potier : Influence des débits d'air primaires et secondaires sur les émissions de NO, CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>**

**Salifou K. Ouiminga<sup>1\*</sup>, Thomas Rogauime<sup>2</sup>, Tizane Daho<sup>1</sup>, Samuel Ouoba<sup>1</sup>, Jean Kouliadiati<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, Université de Ouagadougou 03 BP 7021 Ouaga 03, Burkina Faso ; Tél : (226) 50 39 38 15, Fax : (226) 50 39 33 37

<sup>2</sup> Institut Pprime, Département Fluide, Thermique, Combustion, (UPR 3346 CNRS), ENSMA – Téléport 2, 1 avenue Clément ADER, BP 40109, 86961 FUTUROSCOPE cedex, France ; Tél : (33) 5 49 49 82 90, Fax : 05 49 49 82 91

(Reçu le 11/06/2012 – Accepté après corrections le 22/12/2012)

**Résumé :** Le présent travail concerne l'étude de l'influence des débits d'air comburant sur les rendements des émissions de gaz, lors de la combustion de mélange de tiges de mil et de sacs plastiques en polyéthylène, dans un prototype de four de potier. Au cours de ces investigations, nous nous sommes intéressés au taux d'oxygène résiduel (O<sub>2</sub>) et aux émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de monoxyde d'azote (NO), en fonction des débits d'air primaire (Q<sub>1</sub>) et secondaire (Q<sub>2</sub>). Les fours de potier considérés sont ceux alimentés par un flux d'air naturel. Les débits d'air primaires vont de 45 à 85 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> et les débits d'air secondaires de 20 à 60 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Afin de conduire cette étude numérique, le modèle mis en œuvre est « REACTEUR » basé sur le code CHEMKIN II. La zone modélisée est décomposée en une multitude de réacteurs parfaitement agités (PSR) et le modèle cinétique compte 893 espèces et 113 réactions chimiques réversibles. Pour les teneurs d'oxygène résiduel, le taux d'oxygène résiduel augmente linéairement avec les débits d'air primaire et secondaire. L'augmentation de l'air secondaire entraîne, dans un premier temps, une amélioration de la combustion puis, provoque par la suite une baisse du rendement de consommation d'oxygène. Pour les émissions de CO<sub>2</sub>, une augmentation du débit d'air primaire entraîne une hausse du taux de conversion du carbone en dioxyde de carbone pour la gamme de température étudiée (850 à 950°C), le dioxyde de carbone est produit très rapidement au sein de la zone primaire de combustion. L'apport d'air secondaire entraîne une baisse des teneurs en CO<sub>2</sub> par phénomène de dilution, celui-ci étant formé, en zone primaire de combustion. Concernant le NO il ressort que pour des débits primaires inférieurs ou égaux à 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, les émissions de NO sont, en partie, contrôlées par la concentration en oxygène du milieu réactif. Pour des débits d'air primaires supérieurs à 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, la formation du NO est alors principalement contrôlée par la température de combustion. Enfin, quelle que soit la proportion de plastique, l'air secondaire apporté n'influence quasiment pas la production de NO.

**Mots clés :** débit d'air primaire, débit d'air secondaire, simulation numérique, émissions gazeuses

### **Combustion modelling of cellulose and plastic mixture in a potter's kiln: influence of primary and secondary airflows on emissions of NO, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>**

**Abstract :** This work concerns the study of the influence of air flow on yields of gas emissions during the combustion of a mixture of millet stalks and polyethylene bags in a prototype of kiln. During these investigations, we looked at the rate of residual oxygen (O<sub>2</sub>) and emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and nitrogen monoxide (NO) as a function of primary air flow (Q<sub>1</sub>) and secondary (Q<sub>2</sub>). The potters kilns considered are those fueled by natural air flow. The primary air flows ranging from 45 to 85 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> and secondary air flows from 20 to 60 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. To conduct this numerical study, the model used is "REACTOR" based on the code CHEMKIN II. The modeled area is split into a multitude of perfectly stirred reactors (PSR) and the kinetic model has 893 species and 113 reversible chemical reactions. The rate of residual oxygen increases linearly with flows of primary and secondary air. The increasing of the secondary air allows in a first time, to improve combustion and causes a decrease in oxygen consumption. For CO<sub>2</sub> emissions, an increasing of the primary air flow leads to higher rates of conversion of carbon into dioxide of carbon in the temperature range studied (850 to 950°C). The carbon dioxide is produced very quickly within the primary combustion zone. The supply of secondary air allows a lower of CO<sub>2</sub> levels by dilution phenomenon, the latter being formed in primary combustion zone. Concerning NO it appears that for Primary flows less than or equal to 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, NO emissions are partly controlled by the concentration of oxygen in the reactive medium. For primary airflows over 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, the formation of NO is mainly controlled by the temperature of combustion. Finally, whatever the proportion of plastic, the secondary air injection does not influence NO production.

**Keywords :** primary airflow, secondary airflow, numerical simulation, gaseous emissions

---

\* *Auteur Correspondant :* [salifou\\_ouiminga@univ-ouaga.bf](mailto:salifou_ouiminga@univ-ouaga.bf) / [salif0477@yahoo.com](mailto:salif0477@yahoo.com)

## 1. Introduction

La poterie artisanale est, pour certains pays en voies de développement, une alternative de lutte contre la pauvreté. En effet elle offre aux populations, composées en majorité d'agriculteurs, une occupation à but lucratif pendant toute la période de saison sèche. Toutefois, ce type d'activités reste à ce jour très empirique et artisanal. Il convient donc de mener des recherches plus approfondies afin de moderniser cette activité, tout en maintenant un bon rapport « Qualité / Efficacité / Coût économique pour les potiers et les investisseurs ». Ainsi, nous avons, dans cet article, orienté nos recherches sur l'influence des débits d'air comburant sur les émissions gazeuses, lors de la phase de combustion homogène. Pour le prototype de four étudié notre choix s'est porté sur un modèle à tirage naturel ascendant, simple à mettre en œuvre et dont la géométrie de la zone de combustion correspond à celle que modélise le programme « Réacteur » et le code de calcul Chemkin II<sup>[1-3]</sup> que nous avons utilisé. Vu les problèmes environnementaux causés par les déchets plastiques notamment les sachets plastiques (à base de polyéthylène) dans la plupart des pays d'Afrique et vu les problèmes de recyclage (très peu de sachets plastiques recyclés à ce jour), nous avons choisi d'utiliser comme combustible des mélanges de tiges de mil et de sachets plastiques à base de polyéthylène. Les sachets plastiques sont utilisés ici comme combustibles d'appoint. Les tiges de mil sont un des combustibles les plus utilisés dans le domaine de la poterie artisanale<sup>[4]</sup> car elles sont accessibles et ont un faible coût de revient. Toutefois, elles sont également utilisées dans l'élevage pour la nutrition de certains animaux (bœufs, ânes...) et comme composant pour la fabrication du compost (engrais organique utilisé dans l'agriculture, le maraîchage,...). L'utilisation combinée (en mélange) au sein des fours de potier de ces deux combustibles permet ainsi d'éliminer, en partie, les déchets de sachets plastiques et de réduire l'utilisation des tiges de mil comme combustible.

La littérature sur les mécanismes de formation des oxydes d'azote et de carbone montre l'importance des paramètres de combustion sur les rendements de formation de ces espèces<sup>[1-3; 5-41]</sup> : notamment températures de combustion, temps de séjour, concentration en oxygène, composition du mélange combustible. Toutefois, expérimentalement les paramètres de combustion sont intimement liés entre eux et il est très difficile de mesurer concrètement l'impact de chacun des

paramètres opératoires et des conditions de combustion sur les rendements de formation des polluants. Par exemple, une hausse de la température est propice à la mise en place de réactions d'oxydation qui, étant exothermiques, ont elles mêmes un impact sur la température et inversement. La compréhension de l'évolution des espèces gazeuses nécessite la connaissance de l'impact de chaque paramètre de combustion. Nous avons étudié l'impact de la concentration en oxygène, donc des débits d'air primaire ( $Q_1$ ) et secondaire ( $Q_2$ ), sur les rendements de formation des espèces gazeuses qui sont l'oxygène résiduel ( $O_2$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et le monoxyde d'azote (NO) pour des mélanges à différentes proportions de plastiques. En effet, des auteurs<sup>[1-3; 5-7; 40-41]</sup> montrent que  $Q_1$  et  $Q_2$  sont des paramètres influençant de manière significative la formation et la réduction des oxydes d'azote et de carbone. Afin d'avoir une plage de données assez large pour une investigation rigoureuse de l'impact des paramètres de combustion sur la formation des espèces gazeuses, pour chacun des mélanges, différentes conditions initiales (correspondant à chaque régime de combustion) ont été étudiées. Les débits primaires retenus varient de 45 à 85 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> et les secondaires de 20 à 60 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Les différents mélanges « % tiges de mil - % plastiques » sont : « 100% - 0% », « 95% - 5% », « 90% - 10% », « 85% - 15% », « 80% - 20% », « 75% - 25% » et « 70% - 30% ».

## 2. Partie Expérimentale

### 2.1. Les combustibles

Les combustibles utilisés sont identiques à ceux que nous avons utilisés dans nos travaux antérieurs<sup>[42]</sup>.

### 2.2. Présentation du modèle

Comme pour les combustibles, la présentation du modèle est déjà bien détaillée dans nos travaux antérieurs<sup>[42]</sup>.

### 2.3. Conditions initiales

#### 2.3.1. Durées et températures de combustion

Le modèle du prototype de notre étude est un four à tirage ascendant répertoriés en Afrique de l'ouest<sup>[43]</sup>. C'est ainsi que le modèle du four de type III a été choisi parce que correspondant au type de géométrie susceptible d'être modélisée par le modèle « Réacteur » + Chemkin II. Il s'agit également d'un four avec lequel les températures moyennes de cuisson atteignent 950°C et dont

l'utilisation, la technique et le coût de construction restent abordable pour la plupart des paysans. Des tests préliminaires de combustion ont été réalisés dans ce prototype pour obtenir : la température et la durée de combustion en phase homogène. Ces essais ont concernés les mélanges « % tiges de mil - % sachets plastiques » de : 100% - 0% ; 95 - 5% ; 90% - 10% ; 85% - 15% ; 80% - 20% ; 75% - 25% ; 70% - 30%. Dans le **tableau I**, nous présentons un récapitulatif de ces mesures.

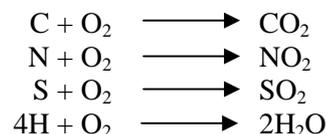
**2.3.2. Débit stœchiométrique théorique d'air pour la combustion**

La répartition de la masse de tiges de mil et de plastique ainsi que la durée et la température de combustion en phase établie dans le prototype du four artisanal, pour une masse de combustible de 400 g, est présentée dans le **tableau II**.

A partir des analyses élémentaires réalisées pour chacun de nos deux combustibles, il est possible de déterminer la composition chimique élémentaire

massique de chacun puis la composition molaire de chaque mélange combustible étudié.

En considérant la combustion complète, tout le carbone se transforme en CO<sub>2</sub>, l'azote en NO<sub>2</sub>, le soufre en SO<sub>2</sub>, l'hydrogène en H<sub>2</sub>O, selon les réactions :



Le besoin en oxygène pour brûler 400g de combustible peut être ainsi calculé. Les temps de combustion des différents mélanges sont connus et l'air comburant contient 20,9% de dioxygène. Si l'on considère que dans chaque cas, la vitesse de perte de masse est constante tout au long de l'expérience alors le débit moyen d'air (Dm) permettant une combustion stœchiométrique est :

**Tableau I :** Températures et durée moyenne de combustion en phase établie, pour 400g de combustible

Proportion de sachets plastiques (%)	Température moyenne (°C)	Durée de combustion en phase homogène (s)
0	850	103
5	875	107
10	900	112
15	915	116
20	950	120
25	950	125
30	950	129

**Tableau II :** Durées et températures de combustion ; Répartition de la masse tige de mil et de plastique dans chaque mélange étudié

% de tiges de mil - % de plastique	100 - 0	95 - 5	90 - 10	85 - 15	80 - 20	75 - 25	70 - 30
Masse des tiges de mil (g)	400	380	360	340	320	300	280
Masse du plastique (g)	0	20	40	60	80	100	120
Durée de combustion (s)	103	107	112	116	120	125	129
Température de combustion (°C)	850	875	900	915	950	950	950

**Tableau III :** Débit d'air stœchiométrique théorique suivant les mélanges « Tiges de mil-Plastique »

Mélanges Tige de mil – Sachets plastique	100% - 0%	95% - 5%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%	75% - 25%	70% - 30%
Dm (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	57,8	59,3	60,1	61,4	62,6	63,2	64,2

### 2.3.3. Conditions opératoires

Pour atteindre nos objectifs de simulation, nous avons choisi de travailler suivant des régimes d'excès d'air primaire inférieurs, égaux et supérieur à 1. Nous définissons l'excès d'air comme le rapport du débit d'air réel par le débit d'air stœchiométrique théorique. Ces conditions sont récapitulées dans le **tableau IV**, avec  $Q_1$  = Débit d'air primaire ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $Q_2$  = Débit d'air secondaire ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $e_1$  = Excès d'air primaire :  $e_1 = Q_1 / \text{Débit d'air stœchiométrique}$ ;  $e_2$  = Excès d'air secondaire :  $e_2 = Q_2 / \text{Débit d'air stœchiométrique}$ .

## 3. Résultats

### 3.1. Oxygène ( $\text{O}_2$ ) : influence de $Q_1$ et $Q_2$

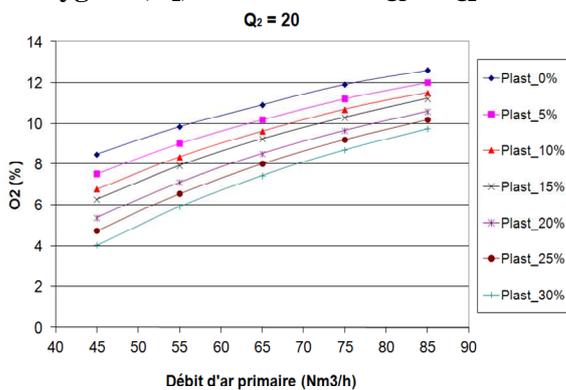


Figure 1 :  $\text{O}_2$  en fonction du débit d'air primaire  $Q_1$ , avec  $Q_2 = 20 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

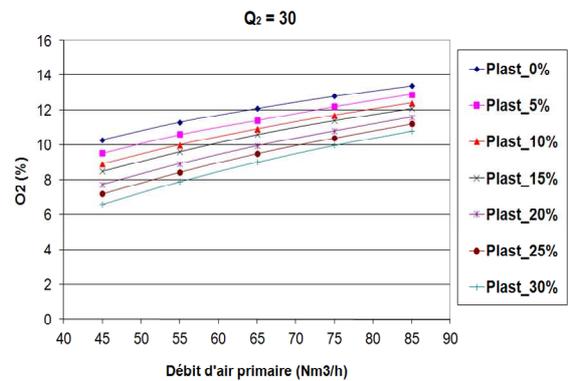


Figure 2 :  $\text{O}_2$  en fonction du débit d'air primaire  $Q_1$ , avec  $Q_2 = 30 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

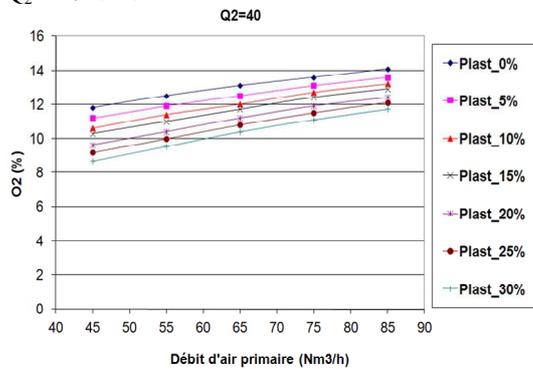


Figure 3 :  $\text{O}_2$  en fonction du débit d'air primaire  $Q_1$ , avec  $Q_2 = 40 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

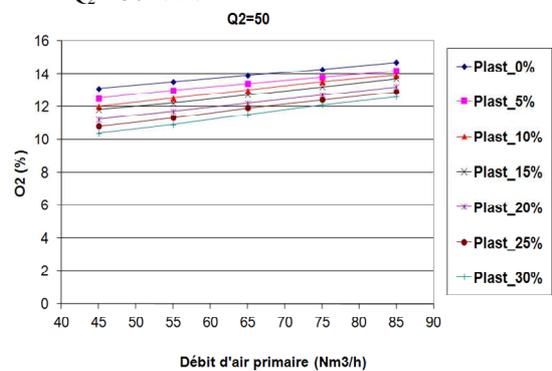


Figure 4 :  $\text{O}_2$  en fonction du débit d'air primaire  $Q_1$ , avec  $Q_2 = 50 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

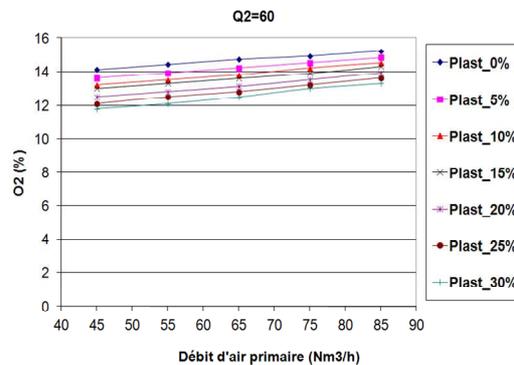


Figure 5 :  $\text{O}_2$  en fonction du débit d'air primaire  $Q_1$ , avec  $Q_2 = 60 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Les études menées par le passé ont montré que les émissions de NO sont fortement dépendantes de la concentration en oxygène du milieu réactif, <sup>[6]</sup>. De même, les travaux de R. A. Yetter et al <sup>[44-45]</sup> montrent que la vitesse d'oxydation du CO en  $\text{CO}_2$  est influencée par la teneur en oxygène. Ainsi, il est nécessaire de vérifier l'évolution de la teneur en oxygène résiduel dans les fumées en fonction des paramètres opératoires.

Les évolutions du taux résiduel d'oxygène en fonction du débit d'air primaire, puis du débit d'air secondaire sont présentées sur les figures ci-dessous. Les courbes sont tracées pour les différents pourcentages de plastiques contenus dans le mélange combustible.

**Tableau IV :** Conditions opératoires de la simulation numérique lors la combustion dans le prototype de four

Proportion Débit d'air stœchiométrique	Q <sub>1</sub> (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) Q <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	45	55	65	75	85	45	55	65	75	85	45	55	65	75	85	45	55	65	75	85	45	55	65	75	85
		20					30					40					50					60				
<b>100% - 0%</b> <b>57,8</b>	e <sub>1</sub>	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,7					0,9					1,0				
<b>95% - 5%</b> <b>59,3</b>	e <sub>1</sub>	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,7					0,8					1,0				
<b>90% - 10%</b> <b>60,1</b>	e <sub>1</sub>	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,7					0,8					1,0				
<b>85% - 15%</b> <b>61,4</b>	e <sub>1</sub>	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,7					0,8					1,0				
<b>80% - 20%</b> <b>62,6</b>	e <sub>1</sub>	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,6					0,8					1,0				
<b>75% - 25%</b> <b>63,2</b>	e <sub>1</sub>	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,6					0,8					0,9				
<b>70% - 30%</b> <b>64,2</b>	e <sub>1</sub>	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3
	e <sub>2</sub>	0,3					0,5					0,6					0,8					0,9				

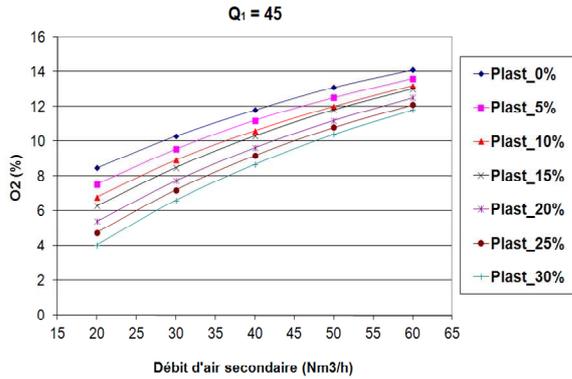


Figure 6 : O<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 45 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

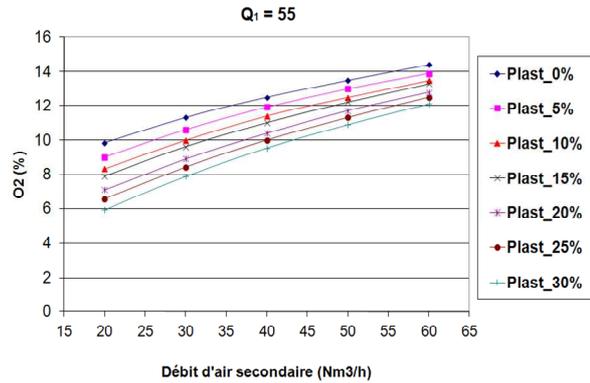


Figure 7 : O<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 55 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

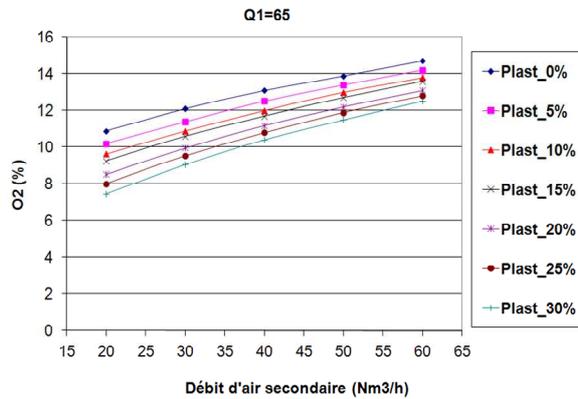


Figure 8 : O<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 65 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

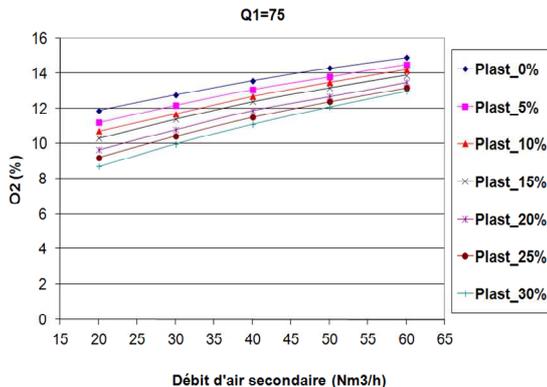


Figure 9 : O<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

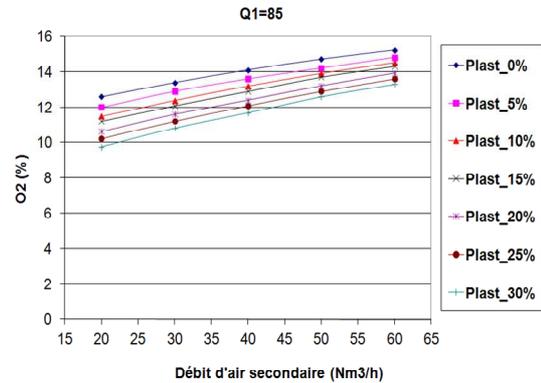


Figure 10 : O<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 85 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

De manière générale, la teneur en oxygène évolue de façon prévisible : une élévation du débit d'air primaire entraîne une hausse de la concentration en oxygène. Cette hausse est quasi linéaire et en bon accord avec les résultats de F. Jabouille et al., Y. Rogaume, T. Rogaume et al., J. Tezanou., A. T. Barhe [9-13; 46], lors de leurs travaux d'incinération en réacteur à lit fixe à contre courant de mélanges de matériaux cellulosiques et plastiques : l'oxygène est une fonction linéaire croissante de l'excès d'air. L'apport du débit d'air secondaire favorise une meilleure combustion avec l'augmentation de la température, [6; 12], qui permet au maximum de réactions d'oxydation d'avoir lieu [9-13; 46]. Dans un

second temps, lorsque le débit continue d'augmenter, il est possible d'atteindre un régime où trop d'air est apporté au milieu réactif, ce qui entraîne une dilution importante des gaz de combustion. Cette dilution donne lieu à une mauvaise combustion donc à une diminution du rendement des réactions de combustion, d'où cette baisse de consommation d'oxygène en fonction du débit d'air secondaire.

### 3.2. Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) : influence de Q<sub>1</sub>

L'évolution des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en fonction du débit d'air primaire est

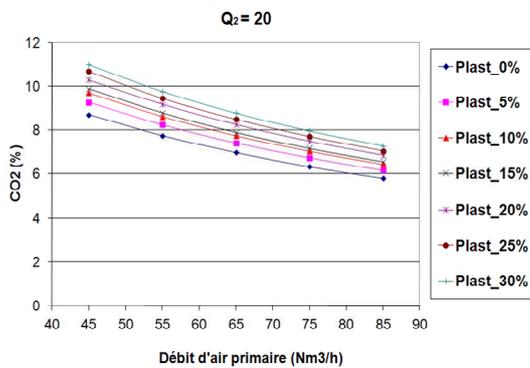
présentée sur les **figures 11 à 15**. Chaque figure correspond à un débit d'air secondaire donné, tandis que les courbes sont tracées pour différentes proportions de plastique dans le mélange combustible.

L'augmentation du débit d'air primaire favorise une diminution de la teneur en CO<sub>2</sub> et ce quelque soit le débit d'air secondaire et la proportion de plastique. Ces résultats sont contraires à ceux rencontrés dans la bibliographie. En effet, les travaux de R. A. Yetter et al. [44 : 45] montrent que la vitesse d'oxydation du CO en CO<sub>2</sub> est plus faible que celle d'oxydation des hydrocarbures en CO et que ces dernières réactions vont alors être prioritaires. Une hausse du débit permet alors l'oxydation des hydrocarbures puis du CO et est donc propice à

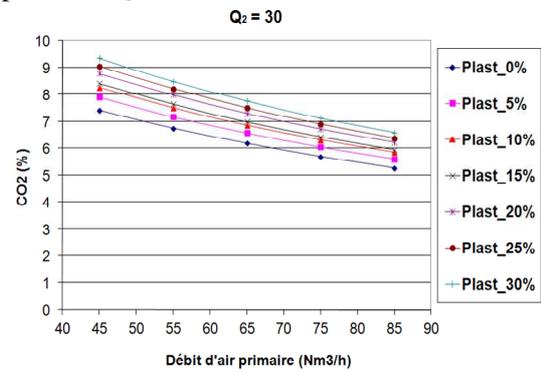
l'émission de CO<sub>2</sub>. De plus, le calcul du taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire, présenté dans le **tableau IV**, montre que celui-ci croît légèrement avec le débit comburant, et ce pour chaque proportion de plastique. Nous pensons ainsi que l'allure des courbes est liée au phénomène de dilution car le taux d'émissions de CO<sub>2</sub> est calculé sur la base du volume total de gaz présent dans la zone de réaction au moment de la combustion.

Ainsi, si nous étudions les rendements de conversion du carbone constitutif du combustible en CO<sub>2</sub>, nous obtenons les résultats suivants :

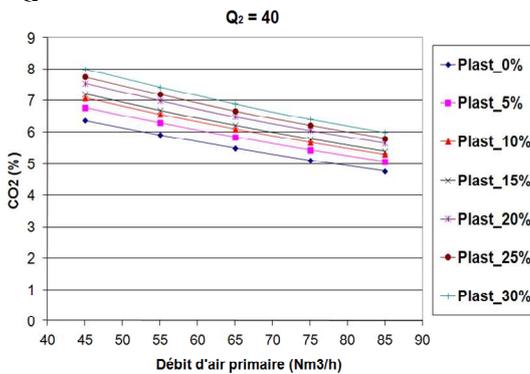
Dans le tableau V, CO<sub>2</sub>\_XX = Pourcentage de carbone converti en CO<sub>2</sub> avec un débit d'air primaire Q<sub>1</sub> = XX Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.



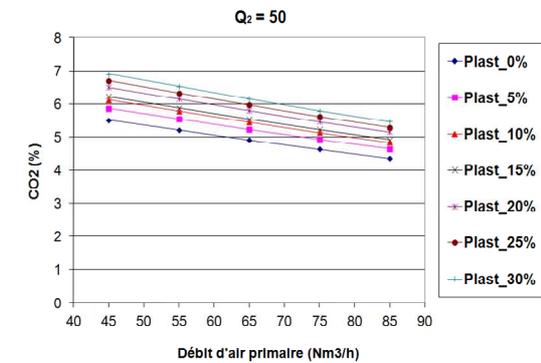
**Figure 11** : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



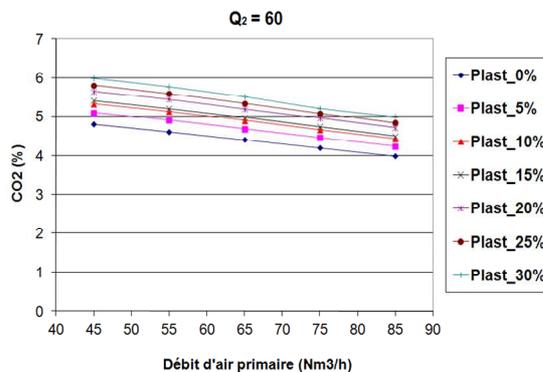
**Figure 12** : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 30 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



**Figure 13** : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



**Figure 14** : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 50 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



**Figure 15** : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 60 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

**Tableau V** : Taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air primaire, pour chaque proportion de plastique étudiée

<b>% de carbone converti</b>					
<b>Q<sub>2</sub> = 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_45</b>	<b>CO<sub>2</sub>_55</b>	<b>CO<sub>2</sub>_65</b>	<b>CO<sub>2</sub>_75</b>	<b>CO<sub>2</sub>_85</b>
<b>0</b>	93%	96%	98%	99%	98%
<b>5</b>	94%	96%	98%	100%	98%
<b>10</b>	95%	98%	99%	100%	99%
<b>15</b>	96%	98%	100%	100%	99%
<b>20</b>	95%	98%	100%	100%	100%
<b>25</b>	97%	98%	100%	100%	99%
<b>30</b>	97%	98%	100%	100%	100%
<b>Q<sub>2</sub> = 30 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_45</b>	<b>CO<sub>2</sub>_55</b>	<b>CO<sub>2</sub>_65</b>	<b>CO<sub>2</sub>_75</b>	<b>CO<sub>2</sub>_85</b>
<b>0</b>	91%	95%	96%	98%	96%
<b>5</b>	92%	95%	97%	99%	97%
<b>10</b>	93%	96%	98%	99%	97%
<b>15</b>	94%	97%	99%	100%	100%
<b>20</b>	94%	96%	99%	100%	99%
<b>25</b>	94%	97%	99%	100%	99%
<b>30</b>	95%	97%	100%	100%	100%
<b>Q<sub>2</sub> = 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_45</b>	<b>CO<sub>2</sub>_55</b>	<b>CO<sub>2</sub>_65</b>	<b>CO<sub>2</sub>_75</b>	<b>CO<sub>2</sub>_85</b>
<b>0</b>	89%	92%	95%	97%	94%
<b>5</b>	90%	92%	96%	98%	97%
<b>10</b>	90%	94%	96%	98%	97%
<b>15</b>	91%	95%	97%	99%	98%
<b>20</b>	91%	94%	97%	99%	97%
<b>25</b>	92%	95%	97%	99%	99%
<b>30</b>	92%	96%	98%	100%	98%
<b>Q<sub>2</sub> = 50 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_45</b>	<b>CO<sub>2</sub>_55</b>	<b>CO<sub>2</sub>_65</b>	<b>CO<sub>2</sub>_75</b>	<b>CO<sub>2</sub>_85</b>
<b>0</b>	86%	91%	93%	94%	95%
<b>5</b>	87%	91%	94%	95%	96%
<b>10</b>	87%	91%	94%	96%	97%
<b>15</b>	88%	92%	95%	97%	97%
<b>20</b>	88%	93%	95%	97%	95%
<b>25</b>	88%	93%	95%	98%	95%
<b>30</b>	89%	93%	96%	98%	97%
<b>Q<sub>2</sub> = 60 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_45</b>	<b>CO<sub>2</sub>_55</b>	<b>CO<sub>2</sub>_65</b>	<b>CO<sub>2</sub>_75</b>	<b>CO<sub>2</sub>_85</b>
<b>0</b>	83%	89%	91%	93%	93%
<b>5</b>	84%	87%	91%	94%	93%
<b>10</b>	84%	87%	92%	94%	93%
<b>15</b>	85%	90%	93%	95%	94%
<b>20</b>	84%	89%	92%	95%	94%
<b>25</b>	85%	88%	93%	95%	94%
<b>30</b>	85%	89%	93%	95%	94%

De façon générale, les résultats présentés dans le tableau nous font remarquer qu'une hausse du débit primaire entraîne une hausse du taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub>.

### 3.3. Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) : influence de Q<sub>2</sub>

L'étude de l'impact du débit d'air secondaire sur les émissions de CO<sub>2</sub> nous a conduit à tracer les courbes ci-dessous en fonction du débit d'air secondaire, ceci pour chaque débit primaire étudié.

Ces courbes sont présentées dans les figures 16 à 20.

De façon générale, pour chaque débit d'air primaire le taux de CO<sub>2</sub> décroît avec l'air secondaire. Afin de vérifier la véracité de ces tendances, le tableau VI ci-dessous, récapitule le taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub>, en fonction du débit d'air secondaire, pour chaque mélange.

Dans le tableau VII : CO<sub>2</sub>XX = Pourcentage de carbone converti en CO<sub>2</sub> avec un débit d'air primaire Q<sub>1</sub> = XX Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

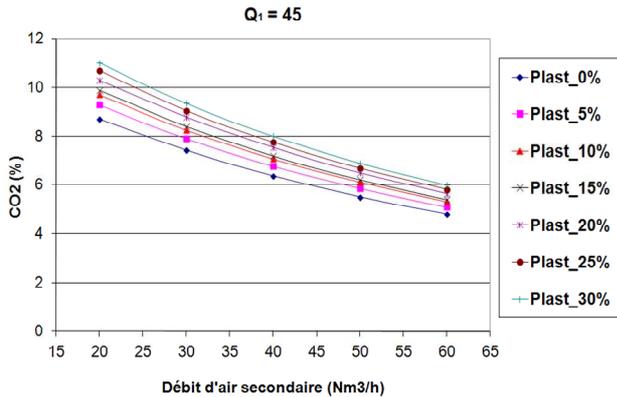


Figure 16 : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 45 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

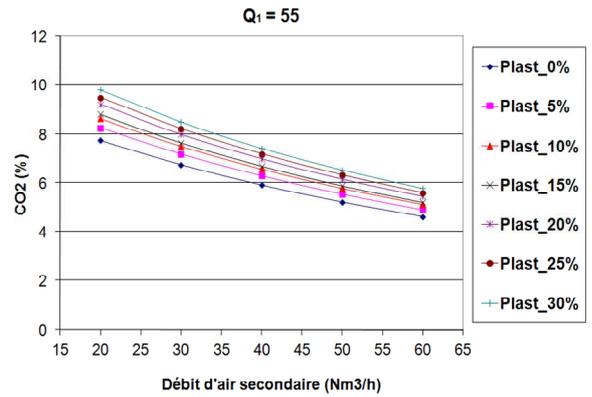


Figure 17 : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 55 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

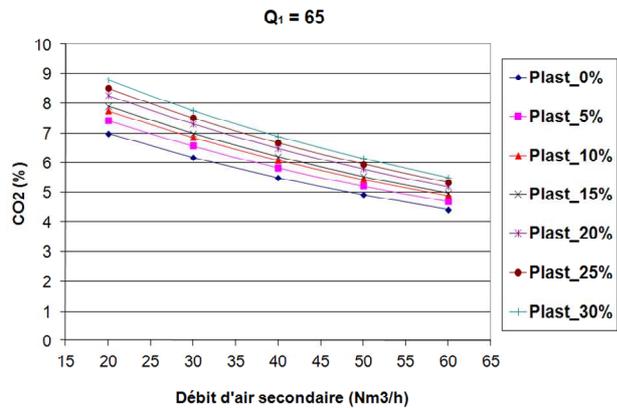


Figure 18 : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 65 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

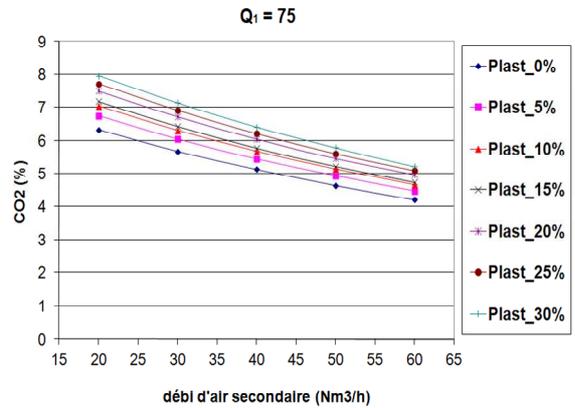


Figure 19 : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

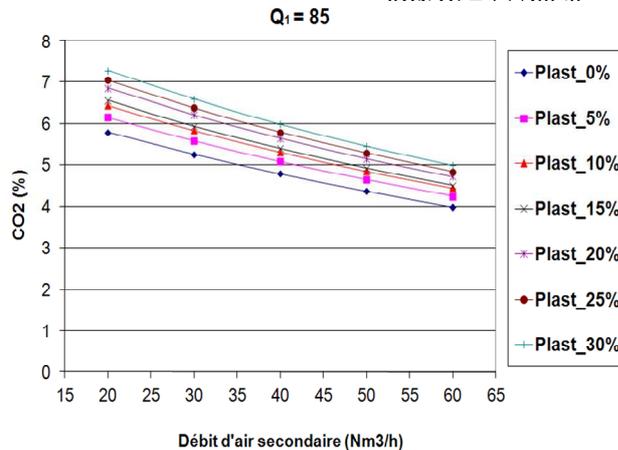


Figure 20 : CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire Q<sub>2</sub>, avec Q<sub>1</sub> = 85 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

**Tableau VI** : Taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire, pour chaque proportion de plastique étudié

<b>% de carbone converti</b>					
<b>Q<sub>1</sub> = 45 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_20</b>	<b>CO<sub>2</sub>_30</b>	<b>CO<sub>2</sub>_40</b>	<b>CO<sub>2</sub>_50</b>	<b>CO<sub>2</sub>_60</b>
<b>0</b>	93%	91%	89%	86%	83%
<b>5</b>	94%	92%	90%	87%	84%
<b>10</b>	95%	93%	90%	87%	84%
<b>15</b>	96%	94%	91%	88%	85%
<b>20</b>	95%	94%	91%	88%	84%
<b>25</b>	97%	94%	92%	88%	85%
<b>30</b>	97%	95%	92%	89%	85%
<b>Q<sub>1</sub> = 55 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_20</b>	<b>CO<sub>2</sub>_30</b>	<b>CO<sub>2</sub>_40</b>	<b>CO<sub>2</sub>_50</b>	<b>CO<sub>2</sub>_60</b>
<b>0</b>	96%	95%	92%	91%	89%
<b>5</b>	96%	95%	92%	91%	87%
<b>10</b>	98%	96%	94%	91%	87%
<b>15</b>	98%	97%	95%	92%	90%
<b>20</b>	98%	96%	94%	93%	89%
<b>25</b>	98%	97%	80%	93%	88%
<b>30</b>	98%	97%	96%	93%	89%
<b>Q<sub>1</sub> = 65 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_20</b>	<b>CO<sub>2</sub>_30</b>	<b>CO<sub>2</sub>_40</b>	<b>CO<sub>2</sub>_50</b>	<b>CO<sub>2</sub>_60</b>
<b>0</b>	98%	96%	95%	93%	91%
<b>5</b>	98%	97%	96%	94%	91%
<b>10</b>	99%	98%	96%	94%	92%
<b>15</b>	100%	99%	97%	95%	93%
<b>20</b>	100%	99%	97%	95%	92%
<b>25</b>	100%	99%	97%	95%	93%
<b>30</b>	100%	100%	98%	96%	93%
<b>Q<sub>1</sub> = 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_20</b>	<b>CO<sub>2</sub>_30</b>	<b>CO<sub>2</sub>_40</b>	<b>CO<sub>2</sub>_50</b>	<b>CO<sub>2</sub>_60</b>
<b>0</b>	99%	98%	97%	95%	93%
<b>5</b>	100%	99%	98%	96%	94%
<b>10</b>	100%	99%	98%	96%	94%
<b>15</b>	100%	100%	99%	97%	95%
<b>20</b>	100%	100%	99%	97%	95%
<b>25</b>	100%	100%	99%	98%	95%
<b>30</b>	100%	100%	100%	98%	95%
<b>Q<sub>1</sub> = 85 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup></b>					
<b>% Plastique</b>	<b>CO<sub>2</sub>_20</b>	<b>CO<sub>2</sub>_30</b>	<b>CO<sub>2</sub>_40</b>	<b>CO<sub>2</sub>_50</b>	<b>CO<sub>2</sub>_60</b>
<b>0</b>	98%	96%	94%	93%	92%
<b>5</b>	98%	97%	97%	94%	93%
<b>10</b>	99%	97%	97%	94%	93%
<b>15</b>	99%	100%	98%	97%	94%
<b>20</b>	100%	99%	97%	95%	94%
<b>25</b>	99%	99%	99%	95%	94%
<b>30</b>	100%	100%	98%	97%	94%

Le calcul du taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub> en fonction du débit d'air secondaire pour chaque proportion de plastique, indique que les teneurs de CO<sub>2</sub> décroissent lorsque le débit d'air secondaire augmente, ce qui est en accord avec les courbes obtenues. Cette évolution peut se justifier par le fait que le programme surestime la formation de CO<sub>2</sub>. En effet, à partir des données initiales (température, débit d'air, durée de combustion, temps de séjour) et de ses caractéristiques, le code PSR calcule les fractions massiques des différentes espèces chimiques, sur l'hypothèse que combustible et comburant se rencontrent instantanément dans un milieu homogène, c'est-à-dire que le temps de diffusion est nul. Or, nous savons que l'oxydation du CO en CO<sub>2</sub> est fortement influencée par l'inhomogénéité du milieu réactif. notamment les

variations locales de température et de richesse. Dans ces conditions, le modèle entraîne une oxydation complète et très rapide des espèces carbonées en CO<sub>2</sub> en zone primaire de combustion, puis cette espèce étant stable, la baisse des teneurs s'explique par un phénomène de dilution, lié à l'injection d'air secondaire.

### 3.4. Monoxyde d'azote (NO) : influence de Q<sub>1</sub>

Les figures 21 à 25 représentent l'évolution des émissions de monoxyde d'azote en fonction du débit d'air primaire pour différentes teneurs en plastique dans le mélange, et plusieurs valeurs du débit d'air secondaire. Les émissions de NO sont exprimées en mg de polluant émis par gramme de combustible brûlé.

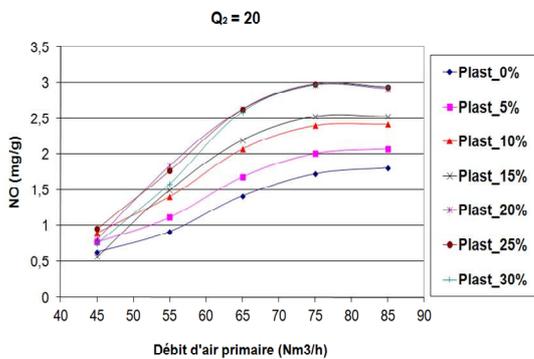


Figure 21 : NO en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

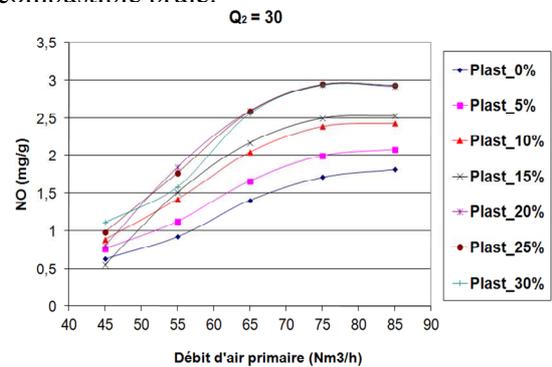


Figure 22 : NO en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 30 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

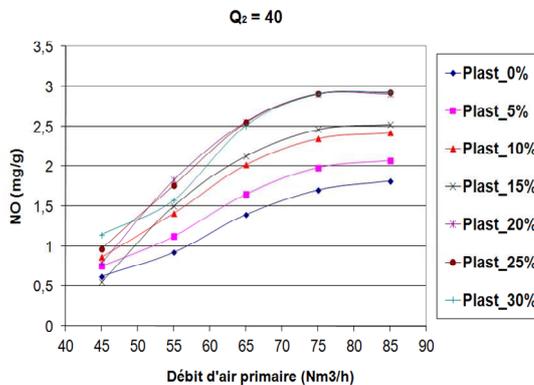


Figure 23 : NO en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

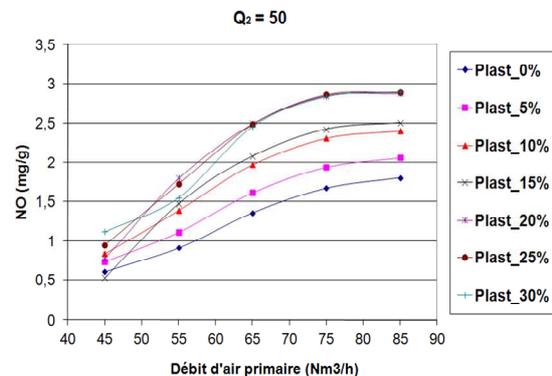


Figure 24 : NO en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 50 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

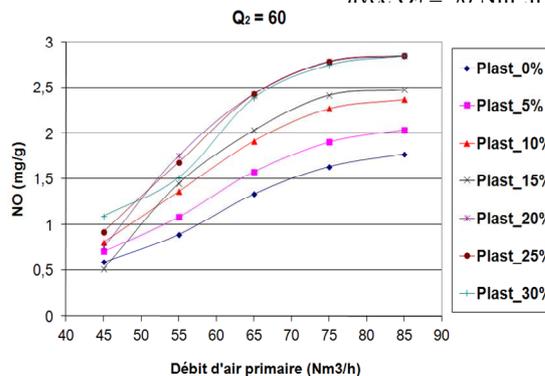


Figure 25 : NO en fonction du débit d'air primaire Q<sub>1</sub>, avec Q<sub>2</sub> = 60 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

De manière générale, les émissions de NO sont une fonction croissante du débit d'air primaire <sup>[6]</sup>. Toutefois, dans notre cas deux tendances d'évolution sont observées quelle que soit la proportion de plastique et pour chaque débit d'air secondaire :

– Pour un débit d'air primaire inférieur à  $75 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ , le NO croît rapidement avec le débit primaire. Ce résultat logique s'explique par les travaux de G. De Soete <sup>[6]</sup> et est lié aux conditions de combustion en dessous de la stœchiométrie. Le NO ne peut pas être entièrement formé en zone primaire de combustion et les intermédiaires azotés sont alors oxydés en zone secondaire, par apport d'air frais. Or, les travaux de T. Rogau et al., F. Richard et al. <sup>[2-3]</sup> sur les mécanismes de formation et de réduction des oxydes d'azote, montrent qu'une réduction des émissions de NO passe d'abord par sa

formation puis sa mise en contact avec des espèces réductrices, pour conduire à  $\text{N}_2$ . Lors de notre étude, le NO formé en zone secondaire n'a pas le temps d'être réduit en  $\text{N}_2$  avant sa sortie de la zone principale de réaction.

– Pour un débit primaire supérieur ou égal à  $75 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ , la concentration de NO reste quasi constante lorsque le débit primaire augmente. Pour ces conditions, la quantité d'oxygène apportée en zone primaire de combustion est suffisante et permet une combustion en excès d'air qui favorise la formation de la quasi-totalité du NO dans la zone primaire de combustion, <sup>[1 ; 3]</sup>.

### 3.5. Monoxyde d'azote (NO) : influence de $Q_2$

Sur les figures 26 à 30, nous vous présentons l'évolution des émissions de NO en fonction du débit d'air secondaire.

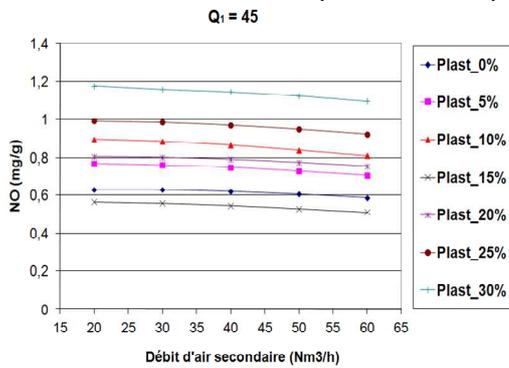


Figure 26 : NO en fonction du débit d'air secondaire  $Q_2$ , avec  $Q_1 = 45 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$

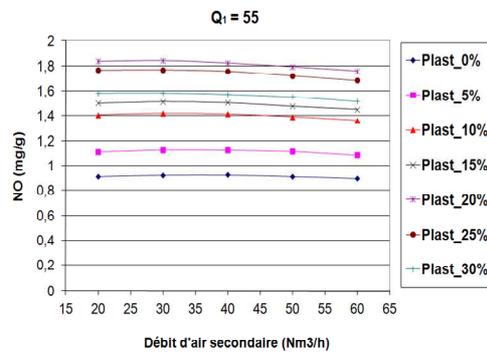


Figure 27 : NO en fonction du débit d'air secondaire  $Q_2$ , avec  $Q_1 = 55 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$

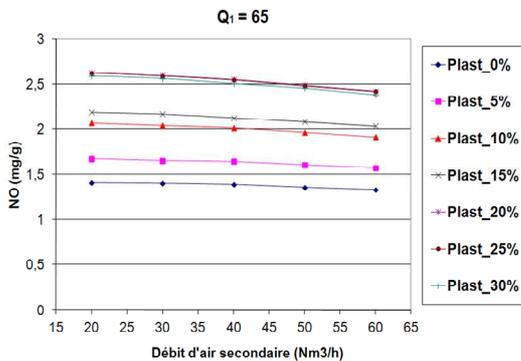


Figure 28 : NO en fonction du débit d'air secondaire  $Q_2$ , avec  $Q_1 = 65 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$

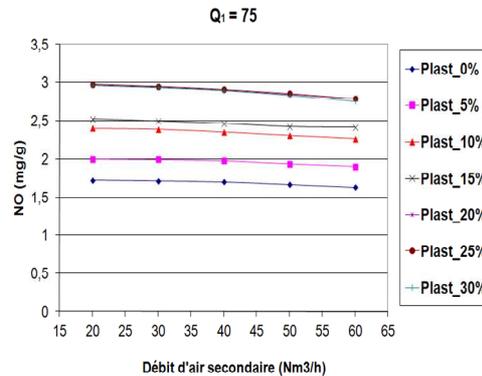


Figure 29 : NO en fonction du débit d'air secondaire  $Q_2$ , avec  $Q_1 = 75 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$

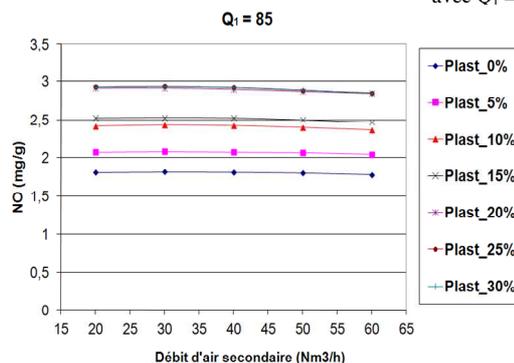


Figure 30 : NO en fonction du débit d'air secondaire  $Q_2$ , avec  $Q_1 = 85 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$

Quelque soient les débits d'air primaire, les taux d'émission de monoxyde d'azote ne varient quasiment pas, en fonction de l'évolution du débit d'air secondaire (les variations des teneurs sont de l'ordre 0,05 à 0,2 mg.g<sup>-1</sup>). Etant donné la situation de défaut d'air dans laquelle prend place la combustion, un équilibre semble prendre place entre la formation du NO par l'oxygène apporté et la réduction du NO formé par les espèces azotées non oxydées.

#### 4. Conclusion

Le modèle « REACTEUR », modifié pour tenir compte des caractéristiques de notre étude, a été utilisé pour aider à l'étude numérique de la combustion, en phase homogène, d'un mélange de combustible « tiges de mil - sachets plastiques », dans un prototype de four de potier. Pour cela, nous avons, au cours de l'étude, déterminé l'influence des débits d'air primaires et secondaires sur les émissions des espèces gazeuses que sont l'oxygène comburant (O<sub>2</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et le monoxyde d'azote (NO).

Des résultats obtenus, nous concluons que :

- L'étude de l'évolution des teneurs en oxygène résiduel en fonction des débits comburants laisse apparaître que :  
Le taux d'oxygène résiduel augmente linéairement avec les débits d'air primaire et secondaire. L'augmentation de l'air secondaire entraîne, dans un premier temps, une amélioration de la combustion puis, provoque par la suite une baisse du rendement de consommation d'oxygène dû à un refroidissement du milieu réactif, lié à une dilution trop importante des gaz de combustion.
- L'étude de l'impact des débits d'air primaire et secondaire sur les émissions de CO<sub>2</sub>, nous révèle que :
  - une augmentation du débit d'air primaire entraîne une hausse du taux de conversion du carbone en dioxyde de carbone : pour la gamme de température étudiée (850 à 950°C), le dioxyde de carbone est produit très rapidement au sein de la zone primaire de combustion.
  - l'apport d'air secondaire entraîne une baisse des teneurs en CO<sub>2</sub> par phénomène de dilution, celui-ci étant formé, en zone primaire de combustion.
- Suite à l'étude de l'influence des débits d'air comburant sur les rendements de formation du NO ; il ressort que :
  - pour des débits primaires inférieurs ou égaux à 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, les émissions de NO croissent avec le débit et sont en partie contrôlées par la concentration en oxygène du milieu réactif ;

- les émissions de NO se stabilisent pour des débits d'air primaires supérieurs à 75 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. La formation du NO est alors principalement contrôlée par la température de combustion.

Ainsi, lorsque les débits primaires sont supérieurs au débit théorique stœchiométrique, le NO est produit principalement dans la zone primaire de combustion, quelle que soit la proportion de plastique dans le mélange. Par contre, pour des débits inférieurs au débit stœchiométrique, la formation du NO a lieu dans les zones primaire et secondaire.

L'étude de l'impact du débit d'air secondaire nous laisse penser que lorsque l'air secondaire croît, les émissions de NO sont quasi constantes quelque soit le débit primaire. En somme, quelle que soit la proportion de plastique, l'air secondaire apporté n'influence quasiment pas la production de NO.

#### Références

- [1] ROGAUME T., AUZANNEAU M., JABOUILLE F., GOUDEAU J. C., TORERO J. L. : Combustion Science and Technology, vol. 175, pp. 1501-1533, 2003
- [2] ROGAUME T., RICHARD F., JABOUILLE F., TORERO J. L. : Combustion Science and Technology, vol. 176, pp. 925-943, 2004
- [3] RICHARD F., ROGAUME T., BARHE A. T., OUIMINGA S. K., TORERO J. L., ROUSSEAU P. : « Influence of the regime of combustion on chemical pathways of NO<sub>x</sub> formation during incineration of cellulosic and plastic materials » Mediterranean Symposium on Combustion, MONASTIR, Tunisia, September 9-13 2007
- [4] OUEDRAOGO A., KIENO F. P., DAHO T., BATHIEBO J. D., OUEDRAOGO R. Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie (SOACHIM), vol. 024, pp. 65 -72, 2007
- [5] DE SOETE G. : « Overall reaction rates of NO and NO<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen » 15th International Symposium on Combustion, the combustion institute ; pp. 1093-1102, 1974
- [6] DE SOETE G. : Revue générale de thermique, n°330-331, pp. 353-373, juin – juillet 1989
- [7] MILLER J. A., & BOWMAN C. T. Progress Energy Combustion Science vol. 15, pp.287-338, 1989
- [8] ZHOU X. : « Contribution à l'étude de l'incinération des déchets urbains : expérimentation en réacteur à lit fixe à contre courant, approche théorique du déplacement du front d'inflammation » Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 1994
- [9] 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, 1996a
- [10] JABOUILLE F., ZHOU X., BREGEON, GOUDEAU J. C. Déchets Sciences et Techniques, n° 2, pp. 20-25, 1996b

- [11] 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
- [12] ROGAUME T., AUZANNEAU M., JABOUILLE F., GOUDEAU J. C., TORERO J. L. : « The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration, Fuel, vol. 81, pp. 2277-2288, 2002
- [13] TEZANOU J. : « Evaluation environnementale 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, France, 2003
- [14] HAYNES B. S. : Combustion and flame Vol. 28, pp. 113-121, 1977
- [15] MORLEY C. : « the mechanism of NO formation from nitrogen compound in hydrogen flame studied by laser fluorescence » 18<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, the combustion institute, pp. 23-32, 1980
- [16] WARGADALAM V. J., LOFFLER G., WINTER F., HOFBAUER H. : Combustion and Flame, vol. 120, pp. 465-478, 2000
- [17] ROBERTS A. F. : Combustion and Flame, vol. 17, pp. 79-86, 1971
- [18] CAUBET S., CORTE P., FAHIM C., TRAVERSE J. P. : Energy from biomass, first conference, pp. 542-547, 1980
- [19] DEGLISE X., RICHARD C., ROLIN A., FRANÇOIS H. Energy from biomass, First conference, pp. 548-553, 1980a
- [20] DEGLISE X., MORLIÈRE P., SCHLICKLIN P. Energy from biomass, First conference, pp. 569-573, 1980b
- [21] DEGLISE X. Revue du palais de la découverte, vol.13 n°130 pp. 51-67, 1985
- [22] SHAFIZADEH F. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis vol. 3, pp. 283-305, 1982
- [23] SHAFIZADEH F. : Fundamentals of Thermo chemical Biomass Conversion, pp. 183-217, 1985
- [24] LEPPA K., SAARNI T. : Ashrae transf. vol. 88, part 2, pp. 577-589, 1982
- [25] WILLIAMS P. T., BESLER S. : Renewable energy, vol. 7 n°3, pp. 233-250, 1996
- [26] MONTAUDO G., PUGLISI C., SAMPERI F. : Polymer degradation and stability vol. 42, pp. 13-28, 1993
- [27] NIELSEN M., JURASEK P., HAYASHI J., FURIMSKY E. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis vol. 35, pp. 43-51, 1995
- [28] HORNSBY P. J., WANG J., ROTHON R., JACKSON G., WILKINSON G., COSSIK K. Polymer Degradation and Stability, vol. 51, pp. 235-250, 1996
- [29] BHANDARE P. S. & al (1997) (BHANDARE P. S., LEE B. K., KRISHNAN K., Journal of thermal analysis, vol. 49, pp. 361-366, 1997
- [30] BENSON S.W. : Prog. Energy Combustion Science, vol. 7, pp. 125 ; 1981
- [31] WARNATZ J., International Symposium on Combustion, pp. 369, Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1981a.
- [32] WARNATZ J., Prog. Astronaut. Aeronaut., vol. 76, pp. 501, 1981b
- [33] FARAVELLI T., FRASSOLDATI A., RANZI E. : Combustion and Flame, vol. 132, pp. 188-207, 2003
- [34] DIXON L. G., WILLIAMS D. J. : « Comprehensive chemical kinetics (C. H. Branford and C. F. H. Tipper, (eds) » vol. 17, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-248, 1977
- [35] GARDINER J. W. C., OLSON D. B. Annual Reviews of Physical and Chemistry, vol. 31, pp. 377, 1980
- [36] WESTBROOK C. K., DRYER F. L., Progress Energy Combustion Science, vol. 10, pp. 1-58, 1984
- [37] GLARBORG P., ALZUETA M.U., DAM-JOHANSEN K., MILLER J. A. : Combustion and Flame, vol. 115, pp. 1-27, 1998
- [38] EL BAKALI A., DAGAUT P., PILLIER L., DESGROUX P., PAUWELS J. F., RIDA A., MEUNIER P. Combustion and Flame, vol. 137, pp. 109-128, 2004
- [39] DAGAUT P., LUCHE J., CATHONNET M. « The kinetics of C<sub>1</sub> to C<sub>4</sub> hydrocarbons-NO interactions in relation with reburning », 28<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 2459-2466, 2000
- [40] DRYER F. L., NAEGELI D. W., GLASSMAN I. Combustion and Flame, vol. 17, pp.270-272, 1971
- [41] DRYER F. L., GLASSMAN I. : « High temperature oxidation of CO and CH<sub>4</sub> » 14<sup>th</sup> international symposium on combustion, the combustion institute, pp. 987-1003, 1972
- [42] OUIMINGA S. K., ROGAUME T., DAHO T., RICHARD F., KOULIDIATI J. « Contribution au dimensionnement d'un prototype de four de potier à tirage d'air naturel » ; Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie (SOACHIM), vol. 032, pp. 64-78, 2011
- [43] DAHO T. : « Bilan thermique quasi-statique et optimisation du rendement d'un four artisanal » Diplôme d'Etudes Approfondies de l'Université de Ouagadougou, 2004
- [44] YETTER R. A., DRYER F. L., RABITZ H. Combustion Science and Technology vol. 79, pp. 97-128, 1991a
- [45] YETTER R. A., DRYER F. L., RABITZ H. : Combustion Science and Technology vol. 79, pp. 129-140, 1991b
- [46] BARHE A. T. : « Etude expérimentale et numérique de l'influence des paramètres opératoires sur les mécanismes de formation des oxydes d'azote lors de la combustion de mélanges de matériaux cellulose et plastiques » Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, 2004