

# Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

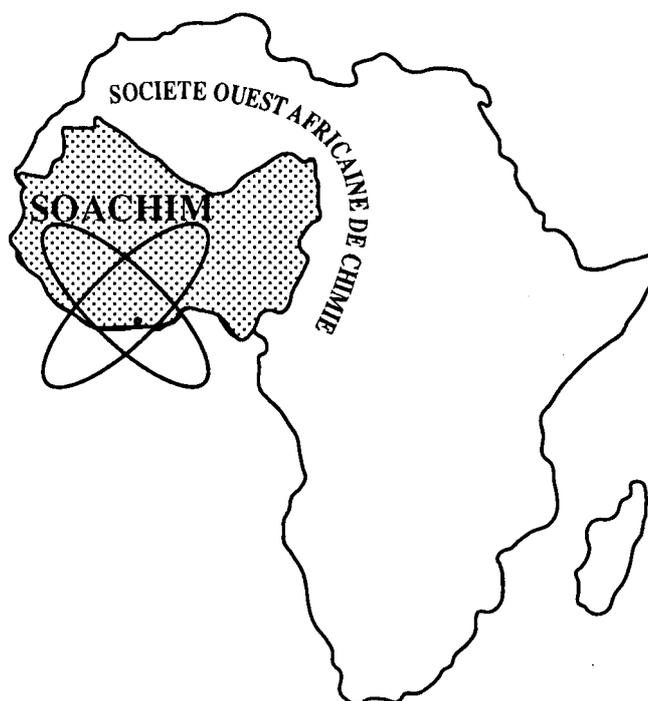
*J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

ISSN 0796-6687

**16<sup>ème</sup> Année, Décembre 2011, N° 032**



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

## **Contribution au dimensionnement d'un prototype de four de potier à tirage d'air naturel**

**Salifou Koucka Ouiminga<sup>1\*</sup>, Thomas Rogau<sup>2</sup>, Tizane Daho<sup>1</sup>, Franck Richard<sup>2</sup>, Jean Kouliati<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 05/05/2011 – Accepté après corrections le 05/12/2011)

**Résumé :** Le présent travail concerne l'étude de l'influence des paramètres géométriques d'un four de potier, sur les rendements des émissions gazeuses polluantes, afin d'aider au dimensionnement de fours plus respectueux de l'environnement. Au cours de ces investigations, les émissions de NO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> ont été suivies. Les fours de potier considérés sont ceux alimentés par un flux d'air naturel. Les paramètres étudiés sont : hauteur du foyer de combustion, étagement de l'injection d'air secondaire et positionnement de l'air secondaire. 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. Les résultats obtenus montrent qu'une optimisation du fonctionnement des fours est obtenue pour les conditions suivantes :

- une hauteur optimale de la « zone de combustion + zone de cuisson » est de 2,5 m ;
- les intervalles entre les entrées d'air secondaire doivent être le plus grand possible : pour les conditions testées ici, un intervalle de 40 cm est conseillé ;
- la zone secondaire de combustion doit se situer à 125 cm au dessus du lit solide, quelque soit le régime de combustion.

Il est intéressant de préciser que ces résultats correspondent à des conditions précises : mélange de combustibles de types cellulosiques et plastiques, diamètre de la chambre de combustion.

**Mots clés :** *Four de potier, modélisation, simulation numérique, émissions gazeuses.*

## **Contribution to the design of prototype of potter kilns under natural airflow**

**Abstract :** This work concerns the study of the influence of geometric parameters of a potter's kiln on yields of gaseous pollutants, to assist in sizing kilns more environmentally friendly. During these investigations, the NO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> were concerned. The potter's kilns are under the influence of an natural airflow. The parameters studied are : height of the combustion fireplace, staging of secondary air injection and the positioning of secondary air. To carry out this numerical study, the model used is "REACTOR" based on the code CHEMKIN II. The area modeled is split into a multitude of perfectly stirred reactors (PSR) and the kinetic model has 893 species and 113 chemical reversible reactions. The results show that optimization of the operation of the kilns is obtained from the following conditions:

- the optimum height of the "combustion zone + cooking area" is 2.5 m;
- the intervals between the secondary air inlets must be the largest possible for the conditions tested here, an interval of 40 cm is recommended ;
- the secondary combustion zone should be at 125 cm above the solid bed, whatever the regime of combustion.

It is interesting to note that these results correspond to specific conditions : mixture of cellulosic and plastic materials, diameter of the combustion chamber.

**Keywords :** *potter's kiln, modeling, numerical simulation, gaseous emissions*

---

\* **Correspondance, courriel :** *salifou\_ouiminga@univ-ouaga.bf / salif0477@yahoo.com*

## 1. Introduction

En Afrique subsaharienne, l'agriculture est l'activité économique prépondérante. Elle fait vivre plus de dix millions d'habitants et est pratiquée par plus de 84% de la population active. Toutefois, la saison des pluies ne dure que quatre (4) mois (en moyenne) par an, ce qui contraint les agriculteurs à pratiquer des activités annexes, telle que la poterie artisanale. Celle-ci nécessite l'utilisation de fours, généralement construits à base d'argile qui ont des architectures et des géométries diverses, classées du type I au type V <sup>[1]</sup>. Parmi les différentes technologies utilisées, les fours à tirage ascendant restent assez répandus car performants comparé surtout aux fours à ciel ouvert.

La construction et le fonctionnement des fours couverts, à tirage ascendant, sont très complexes. La construction doit tenir compte de plusieurs paramètres : matériaux de construction, architecture et dimensions du four, entrée d'air comburant...

L'air comburant apporté dans le four de potier entre par convection naturelle dû au gradient de température et au tirage de la cheminée. Ainsi, en fonction des configurations mise en jeu et de la géométrie des fours, la combustion peut présenter un caractère dangereux et avoir un impact très néfaste que ce soit sur l'environnement ou sur la santé des potiers et des populations habitant à proximité des fours. Les émissions gazeuses se composent d'oxydes de carbone (CO et CO<sub>2</sub>), de soufre (SO<sub>2</sub>), d'azote (NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>), de produits chlorés (dioxines et furanes), de composés organiques volatils (COV), d'hydrocarbures (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), de poussières... Etant donné les conditions expérimentales dans lesquels nous travaillons (température de combustion de 950°C, excès d'air total supérieur à la stœchiométrie), les principaux gaz émis sont le NO, le CO<sub>2</sub>, le CO et les C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>. Toutefois, le logiciel nous donne les gaz produits en fin de combustion : les hydrocarbures et le CO

sont en très faibles quantités tandis que le NO, le CO<sub>2</sub> et le N<sub>2</sub> sont les gaz les plus abondants. Nous notons également la présence de O<sub>2</sub> due à l'excès d'air dans la chambre de combustion. Très peu d'études ont été menées afin d'aider au dimensionnement des fours de potiers dans le but de réduire les émissions polluantes tout en conservant les caractéristiques thermiques des fours <sup>[1]</sup>, ce qui est l'enjeu de cette étude. De plus ces études ne reposent pas sur une investigation paramétrique mais sur des déductions empiriques. L'investigation de l'influence de la géométrie des foyers et conditions opératoires peut se faire de deux (2) manières :

- par des essais expérimentaux uniquement, mais cela demande la construction d'une multitude de différents foyers et se révèle ainsi fort onéreux.

- par une étude de simulation numérique demandant tout au plus la construction d'un prototype, choix que nous avons fait.

De manière à optimiser la combustion et en accord avec la littérature, le prototype de four à mettre en place comporte une zone primaire de combustion avec des entrées dans la partie basse du four et une zone secondaire de combustion avec des entrées d'air dans la partie haute du four. Le dimensionnement de chaque zone, tout comme la position de la zone secondaire et l'emplacement des entrées d'air secondaires, afin d'optimiser la recombustion des gaz issus de la combustion en zone primaire, doivent nécessairement être optimisés.

Dans ce sens les paramètres que nous avons étudiés sont :

- la hauteur de la « zone de combustion + zone de cuisson » : cette zone (à modéliser) doit être suffisamment haute pour permettre aux réactions d'oxydation d'avoir lieu et de se stabiliser avant la sortie du four (il s'agit de l'optimisation du temps de séjour des gaz dans la zone de réaction du four) <sup>[2-3]</sup>.
- l'écartement entre les entrées d'air

secondaires : l'étagement de l'air secondaire permet, dans une moindre mesure de réduire la production de NO<sup>[4]</sup>.

- la position de la zone secondaire de combustion au dessus du lit solide : il est important que la zone secondaire soit placée suffisamment haute au dessus du lit combustible pour que la majorité des réactions d'oxydation s'installent dans la zone primaire de combustion. Ainsi, la recombustion qui a lieu dans la zone secondaire permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote et de carbone<sup>[2; 4]</sup>.

Le développement d'un modèle décrivant l'ensemble du processus de combustion dans le four (écoulements, réactions chimiques, distribution des températures...) est généralement complexe. Il est admis que le couplage d'un modèle chimique détaillé avec un modèle physique également détaillé ne peut encore être raisonnablement réalisé avec les moyens de calcul actuels.

En adoptant une démarche simplifiée, il est possible d'identifier deux grandes approches distinctes :

- la première approche a pour principe le développement d'un modèle physique détaillé couplé à un mécanisme chimique simplifié ou à une tabulation chimique. Ce type de modèle est particulièrement adapté à la simulation de la combustion où les phénomènes de transfert et de transport sont importants.

- la seconde approche consiste à coupler un mécanisme chimique détaillé à un réseau de modèles physiques simples permettant de modéliser une chambre de combustion. Cette approche permet la prise en compte d'une chimie non infiniment rapide à partir d'un mécanisme chimique détaillé, mais néglige les écoulements en considérant dans la plupart des études les phénomènes de diffusion comme infiniment rapide. La résolution de ces modèles se fait classiquement à partir du code de calcul CHEMKIN II.

Cependant, notre objectif étant de modéliser la phase de combustion homogène (on considère que les

paramètres physiques de la combustion sont stables), qui est essentiellement contrôlée par la cinétique chimique, nous avons besoin d'un modèle physique simple couplé à un modèle chimique détaillé prenant en compte beaucoup plus de réactions chimiques. En effet, ce modèle comprend un mécanisme qui est très complet avec 113 espèces intervenant au sein des 892 réactions réversibles.

Afin de mener à bien cette étude, nous avons ainsi utilisé le modèle « REACTEUR » développé et validé au Laboratoire de Combustion et de Détonique<sup>[2-6]</sup>. Les raisons de ce choix sont :

- la géométrie de la zone de combustion à modéliser lors de notre étude est très proche de celle du réacteur à lit fixe à contre courant. Le programme « REACTEUR » a été validé dans ces conditions lors des travaux de T. ROGAUME et al.<sup>[2]</sup> ;

- les combustibles utilisés par T. Rogaume et al.<sup>[2; 5]</sup> sont, tout comme dans notre cas, des mélanges de matériaux cellulosiques et plastiques et sont donc proches des nôtres ;

- les conditions de combustion rencontrées lors de notre étude sont proches de celles pour lesquelles le programme a été validé, notamment les températures (800 à 1100°C) et la richesse locale (excès d'air total de 1,2 à 3,7)<sup>[2; 5-6]</sup>.

Dans un premier temps, une présentation succincte du logiciel Chemkin II et du modèle PSR (Perfectly Stirred Reactor : Réacteur Parfaitement Agité) utilisé dans le programme « REACTEUR » est réalisée. Puis, le principe du programme ainsi que les conditions initiales de modélisation, sont présentés avant les résultats.

## **2. Les combustibles**

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>[1]</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'horticulture...). 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.

- Les tiges de mil proviennent des moissons que les paysans effectuent chaque saison. On les retrouve en quantité non négligeable car le mil (sorgho) est une des denrées les plus cultivées au Burkina (aliment de base le plus consommé par la population). Elles contiennent principalement des parois végétales et sont constituées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine qui représentent la presque totalité de la matière organique (60 à 80%) de la plante <sup>[7]</sup>.

- Le polyéthylène (PE), appartient aux polyoléfines. On distingue deux types de PE : le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène basse densité (PEbD : c'est celui que nous avons considéré lors de nos travaux). Leur masse volumique varie entre 915 et 950 kg.m<sup>-3</sup>. Le PE est souvent utilisé dans la fabrication des films, des sacs et des sachets plastiques. Il

est composé de 85% de carbone et de 15% d'hydrogène <sup>[8]</sup>. En pourcentage massique, il est composé de 99% de matières volatiles et de 1% de carbone fixe <sup>[9]</sup>. Le polyéthylène a la particularité d'avoir un taux d'humidité très faible, de l'ordre de 2 à 3% <sup>[10]</sup>.

Une analyse élémentaire des tiges de mil et des emballages plastiques en polyéthylène, a été effectuée afin de caractériser avec précision nos combustibles et de mener des bilans matières. Pour cela, des échantillons de chaque composant ont été analysés pour le dosage des éléments majoritaires c'est-à-dire : C, H, O, N, S, Cl, H<sub>2</sub>O et cendres. Ces analyses ont été réalisées par le Service des Analyses du Centre National de Recherches Scientifiques (CNRS) sur 5 échantillons différents de chaque combustible. Les valeurs présentées dans le **tableau I** correspondent ainsi à la moyenne des teneurs issues des 5 analyses par combustible.

### 3. Présentation du logiciel Chemkin II

La résolution numérique de la partie chimique de la combustion peut être réalisée par l'utilisation d'un code de calcul spécifique. Le plus couramment utilisé est le code CHEMKIN II, développé au SANDIA Laboratoire par R. J. Kee et al. » <sup>[11]</sup>.

Le choix de CHEMKIN II se justifie par le fait que nous modélisons la phase de combustion homogène qui est contrôlée par la cinétique chimique d'où la prédominance de ce phénomène par rapport à celui des écoulements. Il convient donc d'utiliser un logiciel composé d'un modèle chimique détaillé couplé à un modèle physique simple, ce qui est le cas de CHEMKIN II.

**Tableau I :** *Composition élémentaire des constituants du mélange combustible*

Eléments	Tiges de mil (%)	Sachets plastiques (%)
Carbone (C)	44,4	73,8
Hydrogène (H)	6	11,5
Azote (N)	0,3	0,2
Soufre (S)	0,15	0,2
Oxygène (O)	43,8	4,8
Chlore (Cl)	Traces	Traces
Eau (H <sub>2</sub> O)	4,4	2,5
Cendres	0,8	6,7

#### 4. Principe du programme « Réacteur »

Le programme « réacteur » spécifique à cette application a été développé puis optimisé par T. Rogeume et al. [6; 12]. Il a dû être repris et modifié afin de s'appliquer à notre étude. Il utilise le package CHEMKIN-II, développé par R. J. Kee et al. [11] et le modèle du réacteur parfaitement agité (PSR) mis au point par P. Glarborg et al. [13].

Le modèle chimique utilisé est celui développé par P. Dagaut et al sur la recombustion des oxydes d'azote [14]. Le programme permet de modéliser l'ensemble des réactions chimiques qui ont lieu en zone gazeuse de combustion, c'est à dire du sommet du lit solide, à la sortie du four. La zone modélisée est découpée en une infinité de PSR s'auto-incrémentant sur toute la hauteur du four. Il doit ainsi permettre la détermination de la composition des fumées en sortie du four à partir de la simple connaissance des fractions molaires des produits formés lors de la dégradation thermique du mélange combustible et des débits comburants.

La modélisation est réalisée lorsque la combustion au sein du four est supposée établie. On se place alors dans le cas où le lit solide est à la moitié de sa hauteur initiale. Le programme permet ainsi de suivre l'évolution d'une tranche horizontale (modélisée par un PSR) de gaz tout au long de son parcours au sein du four. La combustion étant établie, tous les paramètres de combustion comme la température, la pression, les écoulements, la concentration en oxygène et les émissions polluantes sont stables au cours

du temps. Cette tranche de gaz peut donc être considérée comme représentative de la combustion établie dans le réacteur. La zone d'oxydation des gaz de dégradation est ainsi décomposée en différents réacteurs parfaitement agités superposés, s'auto incrémentant sur toute la hauteur du four. Ce système a pour principaux avantages :

- le découpage en une infinité de petits réacteurs parfaits permet de se rapprocher au maximum des conditions de combustion rencontrées au sein de ce type de four ;
- la faible taille de chaque PSR permet de considérer que le mélange est homogène en son sein ;
- la prise en compte des paramètres expérimentaux importants, tels que les débits d'air et les températures de combustion ;
- la prise en compte des entrées d'air secondaire et de leurs emplacements pour le respect des temps de séjour des gaz en milieu oxydant et à forte température ;
- le suivi de la formation des polluants sur toute la hauteur du four : détermination des zones importantes de formation des polluants ;
- le système est évolutif et facilement adaptable à de nouvelles géométries de four.

Ce modèle a été conçu à partir des hypothèses émises dans le cas d'une combustion avec excès d'air primaire supérieur ou égal à 1, c'est-à-dire avec des vitesses de diffusion très rapides de sorte que la combustion soit contrôlée par la cinétique chimique. Néanmoins, la

comparaison des résultats expérimentaux et théoriques réalisée par T. Rogeau et *al* a permis d'observer un bon accord lors de la combustion avec des excès d'air inférieurs à 1 [2]. De même, F. Richard et *al.* réalisent des tests sur le comportement du modèle en fonction des excès d'air et montrent que l'utilisation du modèle peut être généralisée à l'ensemble des conditions expérimentales quelles que soient les valeurs des excès d'air [3].

La **figure 1** présente le principe du découpage en tranches, lors de notre application pour la modélisation des fours de potier. Le découpage du foyer de combustion en zone primaire, secondaire et tertiaire joue un rôle important.

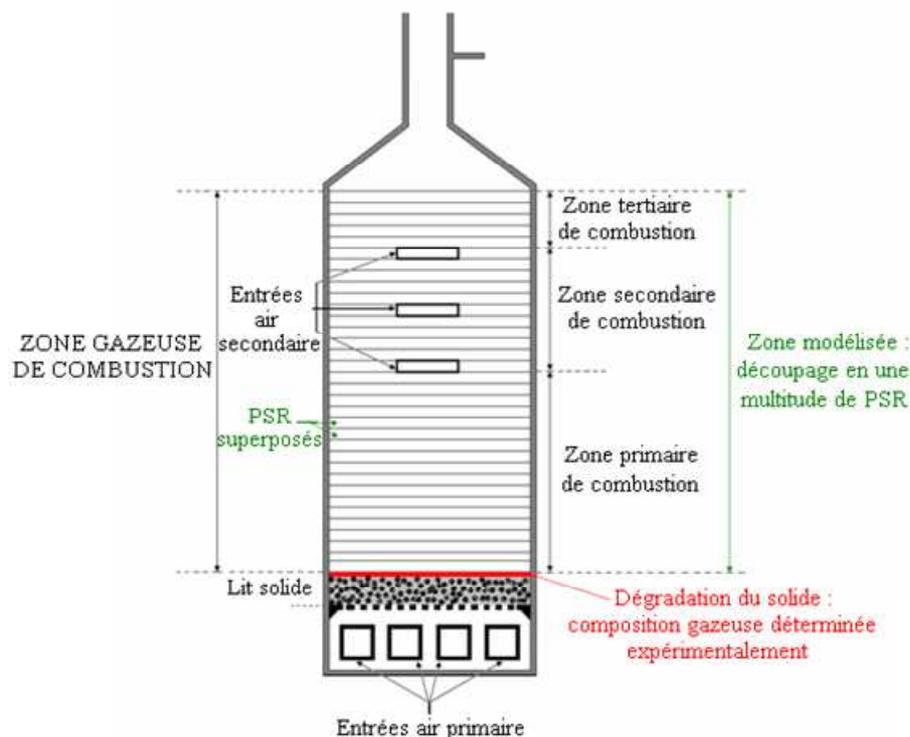
**-Zone primaire :** dans cette zone, s'installent les réactions d'oxydation des hydrocarbures et des intermédiaires azotés tels que HCN, NH<sub>3</sub>, HNCO pour former essentiellement du CO, du CO<sub>2</sub>, du NO et du N<sub>2</sub>. C'est ici que les phases d'inflammation et de combustion homogène ont lieu.

**-Zone secondaire :** elle est caractérisée par

un étagement de trois entrées d'air secondaire et est le siège d'une combustion homogène. Les entrées permettent la combustion des imbrûlés (suies, goudrons,...) issus de la zone primaire ; l'oxydation des intermédiaires réactionnels qui n'ont pas pu être oxydé en zone primaire et la réduction des oxydes (oxydes de carbone, d'azote,...) formés en zone primaire de combustion.

**-Zone tertiaire :** C'est dans cette partie du four la combustion prend fin avec l'extinction des flammes, caractérisée par la baisse de la température de combustion. Le programme nécessite en données initiales les débits d'air de combustion, les températures au sein des différentes zones de combustion (primaire, secondaire et tertiaire), la vitesse de perte de masse, la durée de combustion ainsi que la composition des gaz de dévolatilisation provenant de la dégradation thermique du mélange combustible solide.

La **figure 2** présente de manière détaillée le fonctionnement du programme « REACTEUR ».



**Figure 1 :** Principe de la modélisation du four

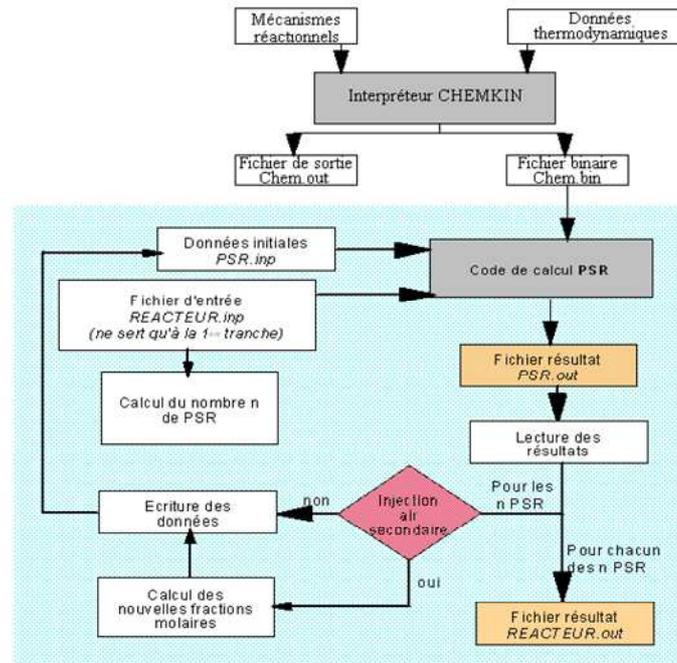


Figure 2 : Architecture détaillée du programme « REACTEUR »

En utilisant les différentes données fournies au sein du fichier d'entrée REACTEUR.inp et en fonction du temps de séjour des gaz au sein de chaque réacteur parfaitement agité, le programme permet de calculer le volume de chaque PSR : ce volume diffère au sein des différentes zones du four en fonction des vitesses d'écoulement des gaz (débits comburants et combustibles, températures). A partir du calcul des volumes des différents réacteurs parfaitement agités, le programme calcule alors le nombre « n » de PSR nécessaire à la simulation de la zone souhaitée. Le programme effectue alors n fois la boucle de calcul correspondant à chaque PSR. A la fin du calcul, un fichier de sortie est créé : REACTEUR.out. Ce fichier permet l'enregistrement de la concentration des différentes espèces chimiques à chaque pas de calcul, donc après chaque PSR ainsi que l'emplacement (hauteur) de la tranche correspondante. Il est alors possible de suivre l'évolution de la formation de chaque polluant en chaque point du four. De plus, suivant la ligne de commande sélectionnée, le programme permet de calculer les vitesses de chaque réaction mise en jeu et les vitesses nettes de

formation et de réduction de chaque espèce gazeuse au sein de la tranche désirée.

## 5. Détermination des conditions initiales

### 5.1. Durées et températures de combustion

Le modèle du prototype de notre étude a été choisi parmi des fours à tirage ascendant répertoriés en Afrique [15]. C'est ainsi que le modèle s'inspire du four de type III parce que correspondant au type de géométrie permettant l'application du modèle « REACTEUR ». 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 abordables 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 concerné les mélanges « % tiges de mil / % sachets plastiques » de : 100% - 0% ; 90% - 10% ; 85% - 15% ; 80% - 20% ; 75% - 25% ; 70% - 30%. Dans le **tableau II**, nous présentons un récapitulatif de ces mesures.

Afin de simplifier notre étude, cette étape de dimensionnement du four a été réalisée

à partir d'un seul mélange combustible type : 80% de tige de mil et 20% de plastiques. Ce mélange a été choisi pour sa représentativité ainsi que pour sa température de combustion (950°C), qui

correspond à la gamme de température permettant d'optimiser la combustion de mélanges de matériaux cellulosiques et plastiques [5].

**Tableau II** : Températures et durées moyennes de combustion en phase établie pour 400 g de combustibles

Proportions de sachets plastiques (%)	Température moyenne (°C)	Durée de combustion de la phase homogène (s)
0	850	103
10	900	112
15	915	116
20	950	120
25	930	125
30	965	129

### 5.2. Débit stœchiométrique théorique d'air comburant

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

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.

La composition du mélange disposé dans le four est donc :

**Carbone** :  $(320 \times 44,38\%) + (80 \times 73,81\%) = 201,064 \text{ g}$  soit 16,7553 moles

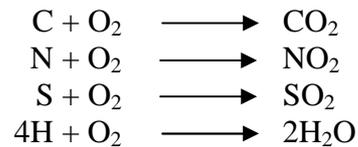
**Hydrogène** :  $(320 \times 6,05\%) + (80 \times 11,49\%) = 28,552 \text{ g}$  soit 28,552 moles

**Azote** :  $(320 \times 0,3\%) + (80 \times 0,2\%) = 1,12 \text{ g}$  soit 0,08 mole

**Soufre** :  $(320 \times 0,16\%) + (80 \times 0,19\%) = 0,664 \text{ g}$  soit 0,0207 mole

**Oxygène** :  $(320 \times 43,76\%) + (80 \times 4,79\%) = 143,864 \text{ g}$  soit 8,9915 moles

En considérant une combustion complète et ainsi que 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 les 400 grammes de combustible est :

$$[16,7553 + (28,552 / 4) + 0,08 + 0,0207] - (8,9915 / 2) = 19,4983 \text{ moles de dioxygène,}$$

Soit dans les conditions normales de température et de pression, un volume de :

$$19,4983 \times 22,4 = 436,761 \text{ Normo Litre de O}_2$$

Les temps de combustion du mélange est connu (120 secondes) 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 permettant une combustion stœchiométrique est :

$$(436,761 \cdot 10^{-3} / 0,209) \times (3600 / 120) = 62,7 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

En considérant les erreurs de mesure, aux hypothèses formulées et aux différents calculs effectués, nous considérons un débit d'air comburant stœchiométrique moyen de l'ordre de 65 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

### 5.3. Conditions opératoires

Pour atteindre nos objectifs de simulation, nous avons choisi de travailler suivant des régimes d'excès d'air primaire égaux et supérieur à 1.

Ces conditions sont récapitulées dans le tableau V, où :

$Q_1$  = débit d'air primaire ;  $Q_2$  = débit d'air secondaire ;  $Q_t$  = débit d'air total.

$e_1$  = excès d'air primaire ;  $e_2$  = excès d'air secondaire ;  $e_t$  = excès d'air total.

**Tableau III :** Répartition de la masse de plastiques et de tiges de mil pour le mélange étudié

% tiges de mil - % sachets plastiques	Masse des tiges de mil	Masse de plastique	Durée de combustion	Température de combustion
80 - 20	320 g	80 g	120 s	950°C

**Tableau IV :** Composition chimique élémentaire des tiges de mil et des sachets plastiques

% Composés	% C	% H	% N	% S	% O
Tiges de mil	44,38	6,05	0,3	0,16	43,76
Sachets plastique	73,81	11,49	0,2	0,19	4,79

**Tableau V :** Conditions opératoires de la simulation numérique

% tiges de mil % sachets plastiques	$Q_1$ (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	40	40	65	65	80	80
	$Q_2$ (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	20	40	20	40	20	40
	$Q_t$ (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	60	80	85	105	100	120
80% - 20%	$e_1$	0,6	0,6	1,0	1,0	1,2	1,2
	$e_2$	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
	$e_3$	0,9	1,2	1,3	1,6	1,5	1,8

### 6. Modélisation de la géométrie du four

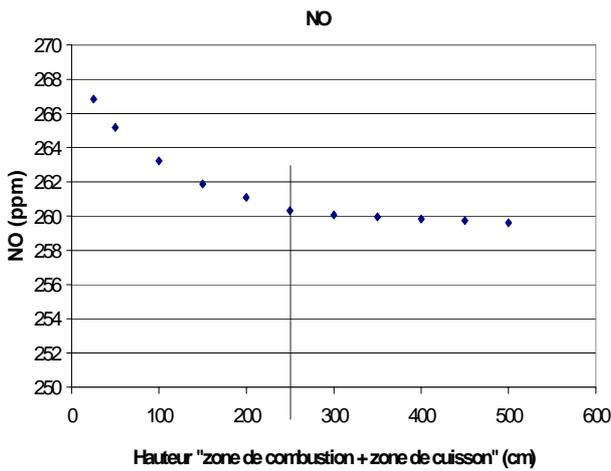
Nous avons un prototype sur lequel nous nous appuyons pour faire cette étude numérique. Cette étude a pour enjeu de donner la géométrie appropriée. Ainsi, le diamètre de la zone gazeuse de combustion du prototype utilisé pour les essais préliminaires et la masse de combustible par essai au niveau du lit solide, ont été conservés. L'étude numérique a concerné le dimensionnement de la hauteur de la « zone de combustion + zone de cuisson », de l'écartement entre les entrées d'air secondaires et du positionnement, de la zone secondaire au dessus du lit solide, à l'aide du programme « REACTEUR » modifié, afin d'optimiser la conception du prototype. Pour cela, nous avons étudié l'évolution des émissions polluantes gazeuses que sont le monoxyde d'azote

(NO), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'oxygène (O<sub>2</sub>) et le diazote (N<sub>2</sub>). Les hydrocarbures étant quasiment tous oxydés dans nos conditions de combustion, nous ne nous sommes pas intéressés à leur évolution en sortie de four.

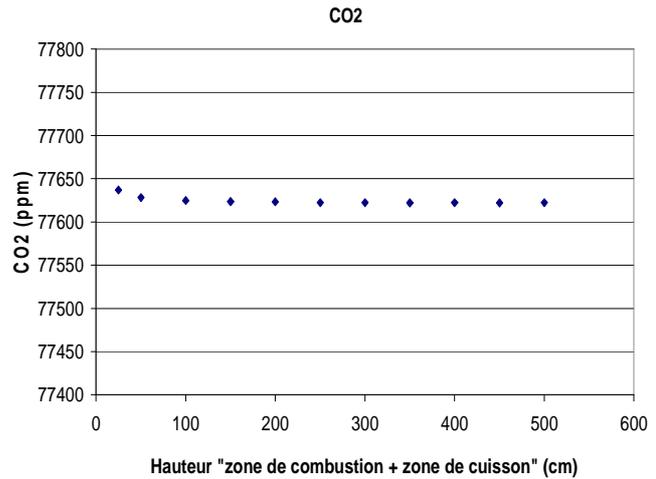
Pour tous les mélanges étudiés, les résultats nous indiquent des tendances identiques lorsque l'on est en régime stœchiométrique et au dessus de la stœchiométrie. Ainsi, nous présentons dans ce papier les résultats pour un seul mélange représentatif des autres résultats.

#### 6.1. Optimisation de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson »

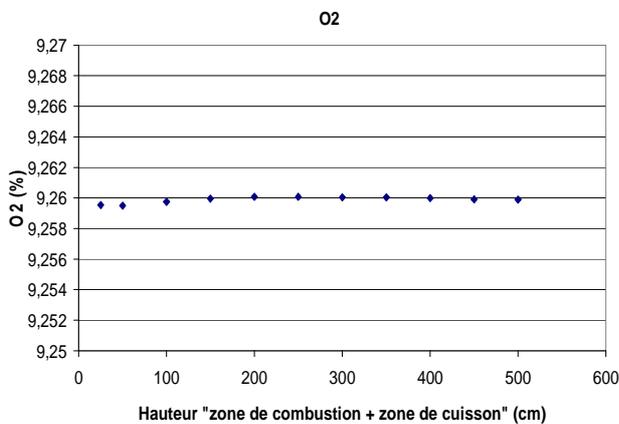
Les figures 3, 4, 5 et 6 représentent respectivement les courbes d'émissions de NO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> en fonction de la hauteur de la « zone de combustion + zone de cuisson ».



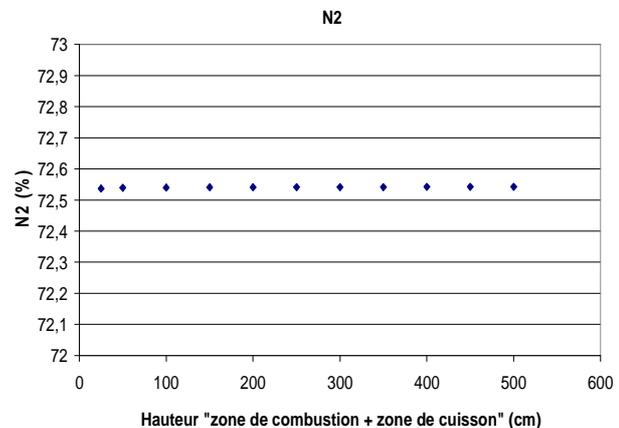
**Figure 3 :** Emission de NO en fonction de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson » ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )



**Figure 4 :** Emission de CO<sub>2</sub> en fonction de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson » ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )



**Figure 5 :** Emission de O<sub>2</sub> en fonction de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson » ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )



**Figure 6 :** Emission de N<sub>2</sub> en fonction de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson » ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

L'enjeu de cette partie est de déterminer la hauteur minimale de four permettant l'obtention du meilleur rendement de combustion et la limitation des émissions polluantes.

L'étude des figures ci-dessus nous permet de constater que les émissions de NO se stabilisent à partir d'une hauteur moyenne de 250 cm soit 2,5 mètres. Les émissions des autres composés gazeux étudiés CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>, restent stables quelle que soit la hauteur de la zone gazeuse de combustion. L'évolution des gaz CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> n'étant pas influencée par la hauteur de la zone principale de combustion, seul le monoxyde d'azote (NO) nous permet de proposer une hauteur optimale de la « zone de combustion + zone de cuisson » pour

notre prototype de four. Ainsi, la hauteur de 250 cm correspond à celle permettant le meilleur compromis entre taille du four et rendement de combustion. En conclusion, il apparaît que pour un four de 37,5 cm de diamètre intérieur dans lequel sont disposés 400 g de mélange de matériaux cellulosiques et plastiques, la hauteur de la zone principale de réaction (« zone de combustion + zone de cuisson ») doit être supérieure ou égale à 2,5 m, hauteur que nous avons retenue pour la suite des travaux.

## 6.2. Ecartement entre les entrées d'air secondaire

T. Rogaume et al. lors de leurs travaux sur le réacteur à lit fixe à contre courant,

ont réparti la zone gazeuse de combustion en trois différentes zones <sup>[2; 5]</sup> :

- une zone primaire de combustion dans laquelle est injecté l'air primaire et où prennent place les réactions d'oxydation des produits volatils provenant du combustible solide en mélange avec cet air ;

- une zone secondaire de combustion dans laquelle est injecté l'air secondaire : dans cette zone la combustion dépend de l'oxydation des produits gazeux provenant de la zone primaire ;

- une zone tertiaire au dessus de la zone secondaire, au sein de laquelle les baisses de températures montrent la fin de la combustion.

Ils montrent que l'essentiel des réactions de combustion des produits volatils ont lieu dans les deux premières zones. Nous avons donc cherché à optimiser la géométrie de ces zones, en étudiant l'influence du positionnement de l'air, de l'écartement de ces entrées d'air secondaire sur les émissions gazeuses.

Les travaux de F. Jabouille et *al.* ont montré que l'étagement de l'air secondaire favorise la réduction des NO<sub>x</sub> <sup>[4; 16]</sup>. Ce résultat a été ensuite confirmé par les travaux préliminaires de T. Rogaume <sup>[17]</sup>.

Les résultats obtenus par ces auteurs montrent alors qu'un étagement à trois niveaux est préférable pour la réduction des émissions gazeuses, mais qu'il convient d'optimiser la hauteur des injections, ainsi que l'écartement entre elles. En effet, la réduction des émissions lors de l'étagement de l'air secondaire est

réalisée par l'obtention d'une stratification de zones pauvres et de zones riches. Comme précédemment, nous avons étudié l'évolution des émissions de NO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>.

Cette étude a été réalisée pour des hauteurs de zones de combustion primaire, secondaire et tertiaire fixes, comme cela est réalisé lors des travaux de T. Rogaume et *al.* qui utilisent le programme « REACTEUR » dans des conditions similaires aux nôtres <sup>[2]</sup> :

- zone primaire : 50% de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson », soit 80 cm ;

- zone secondaire : 30% de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson », soit 48 cm ;

- zone tertiaire : 20% de la hauteur « zone de combustion + zone de cuisson », soit 32 cm.

Les travaux de T. Rogaume et *al.* et F. Jabouille et *al.* montrent que l'influence de l'écartement entre les injections d'air secondaire est indépendante des débits comburants utilisés <sup>[2, 4, 6, 16]</sup>. Ainsi, une seule condition opératoire a été étudiée : 65 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> pour le débit d'air primaire et 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> pour l'air secondaire. Inversement ces auteurs montrent que ce facteur est dépendant de la géométrie même du four. Dans ce sens, nous vous présentons ci-dessous les courbes d'évolution des composés gazeux en fonction des intervalles entre les entrées d'air secondaire, et ce pour trois hauteurs différentes de « zone de combustion + zone de cuisson » : 2 / 2,5 / 3 m.

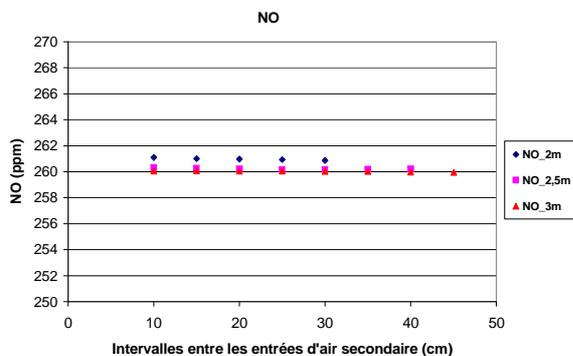


Figure 7 : Influence des intervalles entre les entrées d'air secondaire sur le taux d'émission du NO ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 (Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>)

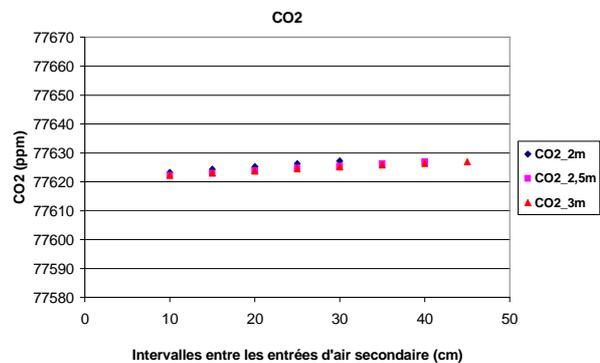


Figure 8 : Influence des intervalles entre les entrées d'air secondaire sur le taux d'émission du CO<sub>2</sub> ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 (Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>)

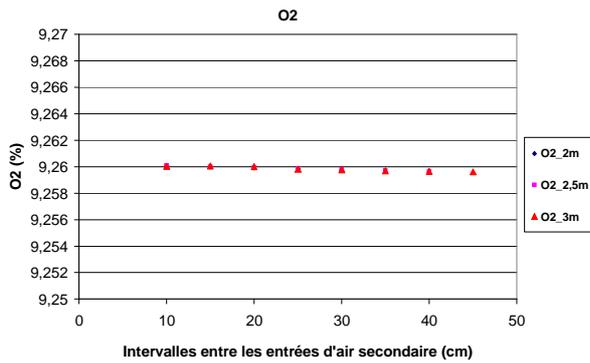


Figure 9: Influence des intervalles entre les entrées d'air secondaire sur le taux d'émission du  $O_2$ ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 ( $Nm^3.h^{-1}$ )

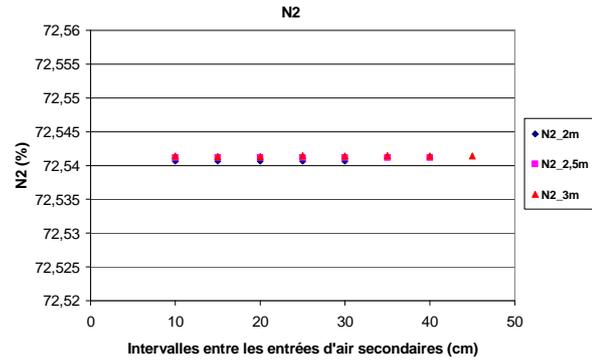


Figure 10 : Influence des intervalles entre les entrées d'air secondaire sur le taux d'émission du  $N_2$ ; débit air primaire / air secondaire = 65 / 20 ( $Nm^3.h^{-1}$ )

L'analyse des résultats montre que lorsque les intervalles entre les entrées d'air secondaire augmentent, et quelles que soient les hauteurs de la zone gazeuse de combustion que nous avons testées (2m ; 2,5m et 3m), les émissions des quatre espèces gazeuses restent quasi constantes. Toutefois les tests préliminaires de F. Jabouille et T. Rogaume sur le réacteur à lit fixe à contre courant, montrent que pour réduire les émissions de NO en zone secondaire de combustion, l'écart entre les entrées d'air secondaire devraient être suffisamment grand pour créer une stratification nette, zone pauvre / zone riche [16-17].

Ces résultats de la bibliographie nous laissent penser qu'il convient de choisir l'écartement le plus grand entre les entrées d'air secondaire lors de la combustion de mélanges de matériaux cellulose et plastiques dans ce type de four. Ainsi, pour une hauteur optimale de la zone principale de réaction de 2,5 mètres et pour une hauteur de zone secondaire de combustion fixe, l'écart le plus grand entre les entrées d'air est de 40 cm.

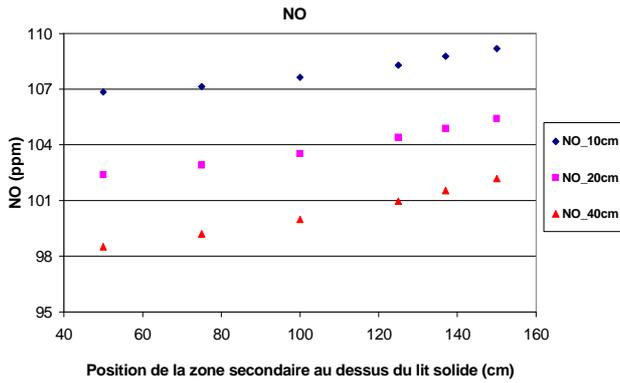
### 6.3. Position de la zone secondaire de combustion au dessus du lit solide

L'objectif est de déterminer la position de la zone secondaire qui permet d'optimiser les taux d'émission des gaz étudiés. Cette étude a été conduite pour trois écartements différents : 10, 20 et 40 cm. Les travaux de T. Rogaume *et al.* et de F. Richard *et al.* montrent que l'influence de l'air secondaire et de son positionnement est dépendante des valeurs mêmes des débits comburants [2-3 ; 6]. Ainsi, afin de valider les résultats, des tests à différents régimes de combustion ont été effectués.

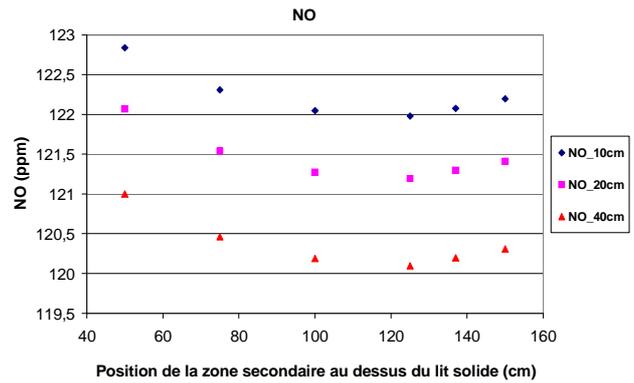
Les figures ci-dessous représentent les émissions de NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide, pour chaque condition testée. Les courbes d'évolution de  $CO_2$ ,  $O_2$  et  $N_2$  en fonction du positionnement de la zone secondaire de combustion ne sont pas présentées car leurs teneurs sont constantes, quelle que soit la position de cette zone au dessus du lit solide.

Tableau VI : Conditions testées

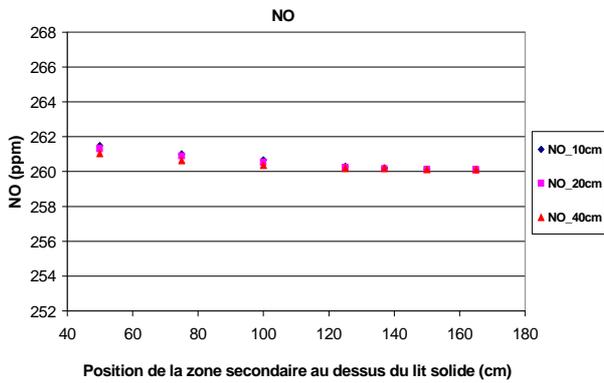
	En dessous de la stœchiométrie		Stœchiométrie		Au dessus de la stœchiométrie	
	40	40	65	65	80	80
Débit d'air primaire $Q_1$ ( $Nm^3.h^{-1}$ )	40	40	65	65	80	80
Débit d'air secondaire $Q_2$ ( $Nm^3.h^{-1}$ )	20	40	20	40	20	40



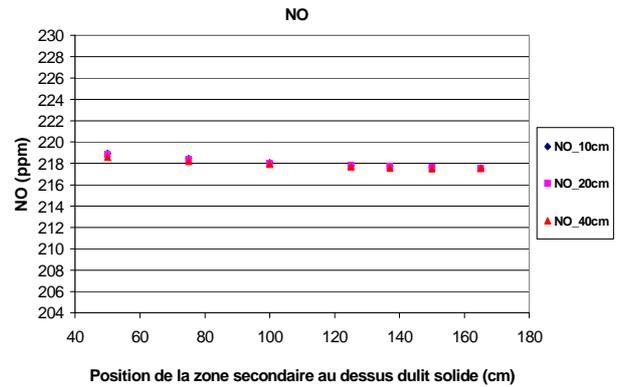
**Figure 11 :** NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide pour des débits de 40 et 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



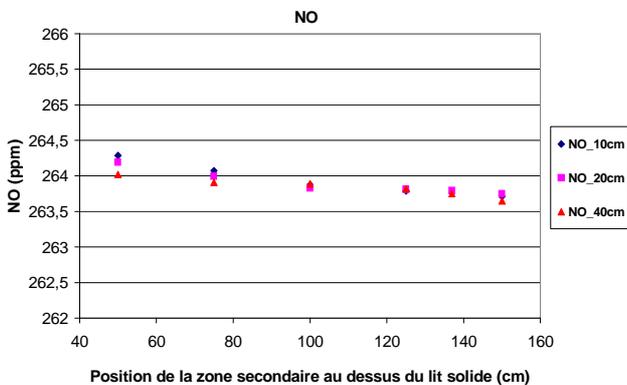
**Figure 12 :** NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide pour des débits de 40 et 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



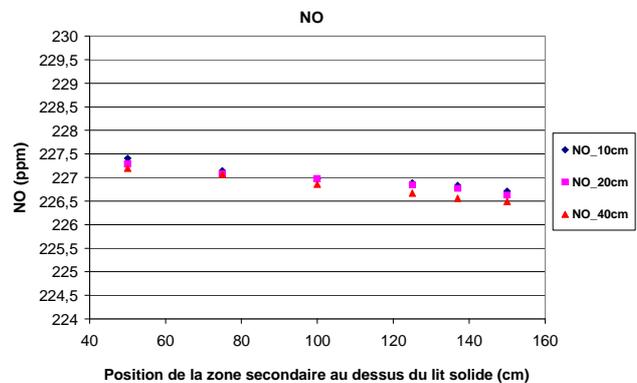
**Figure 13 :** NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide pour des débits de 65 et 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



**Figure 14 :** NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide pour des débits de 65 et 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



**Figure 15 :** NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide pour des débits de 80 et 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>



**Figure 16 :** NO en fonction de la position de la zone secondaire au dessus du lit solide pour des débits de 80 et 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

Pour des débits de 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> en primaire et 20 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> en secondaire, le NO croît avec la position de la zone secondaire au dessus de lit solide. En effet, pour ces conditions les débits comburants restent en deçà de la stœchiométrie : les réactions d'oxydation des espèces azotées en NO sont favorisées au détriment des réactions de réduction du NO. Dans ce cas précis

nous ne pouvons rien affirmer sur la position optimale de la zone secondaire au dessus du lit solide.

En considérant des débits primaires et secondaires respectivement de 40 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, deux tendances se présentent : le taux d'émission de NO diminue dans un premier temps en lorsque la hauteur augmente, puis augmente lorsque la

position de la zone secondaire au dessus du lit est supérieure ou égale à 125 cm. Ce phénomène s'explique par le faible débit primaire utilisé. Ainsi au delà de 125 cm la zone secondaire est trop au dessus de la zone primaire au sein de laquelle la combustion prend place en défaut d'oxygène. Pour ces conditions, les émissions les plus basses de NO sont obtenues lorsque la zone secondaire se situe à 125 cm au dessus du lit solide. De plus, lorsque nous observons les courbes des **figures 11** et **12**, les valeurs les plus basses de NO sont obtenues pour des intervalles entre les entrées d'air secondaires de 40 cm, confirmant les hypothèses précédemment émises.

Pour les conditions opératoires stœchiométriques c'est-à-dire avec  $65 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  de débit d'air primaire, nous avons, dans un premier temps, une légère baisse du NO émis lorsque la position de la zone secondaire au dessus du lit solide croît, puis à partir de 125 cm une évolution quasiment stable du NO.

Au-delà de la stœchiométrie ( $80 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  d'air primaire), les résultats montrent que la position de la zone secondaire au dessus du lit solide n'a que peu d'impact puisque la variation des émissions de NO reste très faible, de l'ordre de 1 à 2 ppm, ce qui représente une évolution d'environ 0,3 %. La hauteur d'injection de l'air secondaire n'a ainsi que peu d'impact.

En conclusion, les essais réalisés pour les trois régimes de combustion (sous, égal et supérieur à la stœchiométriques) montrent qu'un positionnement de l'air secondaire à 125 cm au dessus du lit solide permet l'obtention des plus basses émissions et est donc recommandé.

## 7. Conclusion

Le modèle « REACTEUR », modifié pour tenir compte des caractéristiques de notre étude, a permis le dimensionnement d'un prototype expérimental modélisant le processus de combustion au sein des fours de potiers. Pour cela, nous avons, au cours de l'étude, déterminé l'impact de

paramètres géométriques du four sur les rendements d'émissions des espèces gazeuses, notamment le NO, le CO<sub>2</sub>, l'O<sub>2</sub> et le N<sub>2</sub>. Les paramètres étudiés sont : hauteur du foyer de combustion, l'étagement de l'injection d'air secondaire et le positionnement de celui-ci. Les résultats obtenus nous permettent de faire le bilan suivant :

- la hauteur optimale de la « zone de combustion + zone de cuisson » est de 2,5 m ;
- les intervalles entre les entrées d'air secondaire doivent être le plus grand possible : pour les conditions testées ici, un intervalle de 40 cm est conseillé ;
- la zone secondaire de combustion doit se situer à 125 cm au dessus du lit solide, quelque soit le régime de combustion.

Il est intéressant de préciser que ces résultats correspondent à des conditions précises : mélange de combustibles de types cellululosiques et plastiques, diamètre de la chambre de combustion,...

Toutefois ces résultats ne pourront être confirmés qu'à l'issu d'essais sur un prototype expérimental correspondants aux caractéristiques géométriques ci-dessus citées et dans des conditions physico-chimiques identiques à celles considérées lors de la simulation numérique.

## Bibliographie

[1] A. Ouédraogo, F. P. Kiéno, T. Daho, J. D. Bathiebo, R. Ouédraogo « Bilan thermique quasi statique d'un four artisanal en argile », article publié au Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie ; (2007) vol. 024 ; 65 -72.

[2] T. Rogaume, M. Auzanneau, F. Jabouille, J. C. Goudeau, J. L. Torero : « Computational model to investigate the effect of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration » Combustion Science and Technology ; (2003) vol. 175; 1501-1533.

- [3] F. Richard, T. Rogaume, A. T. Barhe, S. K. Ouiminga, J. L. Torero, P. Rousseaux : « 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. ; 2007, MONASTIR, Tunisia; September 9-13.
- [4] F. Jabouille, X. Zhou, Bregeon, J. C. Goudeau : « Limitation des émissions de NO<sub>x</sub> : du pilote expérimental à l'incinérateur des déchets urbains », Déchets Sciences et Techniques. ; 1996b n° 2 ; pp. 20-25.
- [5] T. Rogaume, M. Auzanneau, F. Jabouille, J. C. Goudeau, J. L. Torero : « The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration » Fuel.; (2002) vol. 81; 2277-2288.
- [6] T. Rogaume, F. Richard, F. Jabouille, J. L. Torero : « Computational model to investigate the mechanisms of NO<sub>x</sub> formation during waste incineration » Combustion Science and Technology.; (2004) vol. 176; 925-943.
- [7] C. Feller, F. Ganry, « Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical ». Agronomie Tropicale XXXVII – 3 – 1982
- [8] A. Y. Levendis, T. Ponagioutou : « Experimental Techniques to Study the Combustion Characteristics of two Commonly found in Municipal wastes ». Municipal waste Combustion. ; (1991) April 15-19 ; 73 – 86.
- [9] F. E. Mark, R. Martin : « Energy recovery – recovery of plastics in municipal solid wastes ». Association of plastics manufactures in Europe ; 1995.
- [10] J. F. Lebourg, V. Maupin, D. Rousseau : « La combustion des matières plastiques ». 1993-1994, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, T. E. N. 3.
- [11] R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller : « Chemkin-II : a Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics » 1989, Sandia Report, n° 89-8009B.
- [12] T. Rogaume : « Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants lors de l'incinération des déchets ménagers » Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, France ; 2001.
- [13] P. Glarborg, J. A. Miller, R. J. Kee : « Kinetic modelling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well stirred reactors » Combustion and flame ; (1986) vol. 65; 177-202.
- [14] P. Dagaut, J. Luche, M. Cathonnet « 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.; (2000) ; 2459-2466.
- [15] T. Daho : « Bilan thermique quasi-statique et optimisation du rendement d'un four artisanal » Diplôme d'Etudes Approfondies de l'Université de Ouagadougou ; 2004.
- [16] F. Jabouille : « 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.
- [17] T. Rogaume, « Conception, réalisation et mise en œuvre d'un réacteur à lit fixe à contre courant », mémoire de DEA, Université de Poitiers, France ; 1998.