

Combustion de granulés de polyéthylène pur et de sachets plastiques à base de polyéthylène : effet de la masse et de la température sur les émissions d'oxydes d'azote et de carbone et l'évolution de l'oxygène

Salifou Koucka Ouiminga^{1*}, Thomas Rogeau², Bila Gérard Segda¹, Moussa Sougoti¹, Jean Kouliati¹

¹ *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*

² *Laboratoire de Combustion et de Détonique (UPR 9028 CNRS), ENSMA – Téléport 2, 1 avenue Clément ADER, BP 40109, 86961 FUTUROSCOPE cedex, France*

(Reçu le 26/05/2009 – Accepté après corrections le 11/12/2009)

Résumé : Le présent travail est une étude expérimentale comparative des émissions d'espèces gazeuses lors de la combustion de granulés de polyéthylène pur et de sachets plastiques à base de polyéthylène. Deux paramètres importants de la dégradation thermique sont étudiés pour chacune des deux matrices : la température et la masse. Cette étude a été réalisée à l'aide du dispositif expérimental du four tubulaire. Les résultats obtenus montrent que la masse et la température sont des paramètres influençant significativement les émissions des espèces gazeuses lors de la combustion de matériaux plastiques à base de polyéthylène. En effet, nous remarquons que le monoxyde d'azote (NO) est une fonction croissante de la température et une fonction décroissante de la masse de combustible ; tandis que le dioxyde de carbone (CO₂) est une fonction croissante de la température et de la masse de combustible brûlée. En dernier lieu, la comparaison des émissions gazeuses pour chacune des deux matrices de PE donne des écarts compris entre 0 et 15%. Ces écarts nous montrent qu'il est possible de substituer les sachets plastiques en faveur des granulés de PE lors d'expériences en laboratoire.

Mots clés : Polyéthylène, Combustion, four tubulaire, émissions gazeuses

Combustion of polyethylene pellets and plastic films with polyethylene : effect of the mass and temperature on emissions of oxides of nitrogen and carbon and the evolution of oxygen

Summary: This work is a comparative experimental study of the emissions of gas species during combustion of polyethylene pellets and plastic films containing polyethylene. Two significant parameters of thermal degradation are studied for each of the two matrixes : the temperature and the mass. This study was carried out using the experimental device of the tubular reactor. The results show that the mass and the temperature are parameters significantly influencing the emissions of gas species during combustion of plastics materials containing polyethylene.

Indeed, we notice that nitrogen oxide (NO) is an increasing function of the temperature and a decreasing function of the fuel mass; while carbon dioxide (CO₂) is an increasing function of the temperature and mass of fuel. Lastly, the comparison of the gas emissions for each of the two matrixes of PE gives variations of emission ranging between 0 and 15%. This last results shows that we can use polyethylene pellets to replace plastics films during the combustion tests in laboratory.

Key words: Polyethylene, Combustion, tubular reactor, gas emission

*Auteur correspondant : Salifou Koucka Ouiminga; E-mail : salifou_ouiminga@univ-ouaga.bf
Adresse : 03 BP 7021 Ouaga 03 ; Université de Ouagadougou, Burkina Faso ; UFR/SEA ; LPCE.

1. Introduction

Au Burkina Faso, l'utilisation du plastique a pris de l'ampleur ces dernières années, liée à ses nombreuses propriétés (légèreté, malléabilité, imperméabilité, esthétique, résistance, rigidité, inflammabilité, etc.). Par conséquent, l'utilisation du plastique - non biodégradable - entraîne une forte augmentation des déchets plastiques dans les grandes villes du pays. Ces déchets posent plusieurs problèmes à l'environnement, notamment les pertes non négligeables pour l'élevage à cause de l'ingestion du plastique, le bouchage des tuyaux et des caniveaux d'évacuation des eaux usées et de pluies, l'étouffement des plans d'agriculture et autres plantes (les sachets plastiques empêchent l'infiltration aisée de l'eau dans le sol), etc. Il est donc primordial de trouver des voies et moyens pour éliminer ces déchets. Trois voies principales sont possibles : recyclage, incinération ou enfouissement [1]. En effet, la seule mise en décharge de déchets bruts est une technique d'élimination condamnée à disparaître à court terme, pour des raisons de capacités d'enfouissement et de protection du patrimoine environnemental. Le recyclage des sachets pose des problèmes du fait que les sachets sont souillés. Sa mise en place demande ainsi une multitude de lavages ayant eux-mêmes un fort impact sanitaire et écologique. La prise de conscience de la problématique « plastique », conduit l'Etat à évoluer des systèmes mono-filières vers la mise en place de procédés de traitement multi-filières, associant le plus souvent la valorisation matière (recyclage, compostage, etc.), l'incinération et la mise en décharge des déchets ultimes. Face à ce gisement, de nombreux procédés de traitement et d'élimination sont mis en œuvre. Parmi ces procédés, les traitements thermiques constituent des moyens fiables et aisés de réduction de la taille et du volume des déchets, notamment par l'incinération. Ainsi, il apparaît que l'incinération est la technique la plus

adéquate, toutefois, il est primordial que celle-ci ne soit pas vecteur d'un transfert de pollution, notamment de la matrice solide en gaz toxiques. Des études de caractérisations du polyéthylène ont déjà été menées [2-13]. Toutefois, ces études concernent les granulés. Or nous avons affaire à un gisement de déchets sous forme de sachets plastiques. Notre étude concerne donc la combustion des sachets plastiques, puis pour des raisons de comparaison avec la littérature, nous comparons les résultats obtenus avec ceux des granulés de polyéthylène pur. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail qui vise à étudier la combustion des échantillons de déchets sous forme de sachets plastiques et de granulés de polyéthylène pur : les résultats nous permettront de voir s'il est possible de substituer les sachets plastiques en faveur des granulés de polyéthylène pur. Il est montré par [14-23], que la dégradation thermique des combustibles solides dépend principalement de la température, la vitesse de chauffe, la masse, la richesse du milieu réactionnel, etc. Dans ce contexte, nous étudions l'influence de la température et de la masse de combustible sur les émissions polluantes de monoxyde d'azote (NO), de dioxyde de carbone (CO₂) et d'oxygène (O₂), à l'aide d'un four tubulaire.

2. Dispositif expérimental

L'étude de combustion a été réalisée à l'aide d'un four tubulaire dont le schéma est présenté dans la figure 1.

La partie centrale du dispositif est constituée du four (1) et du réacteur tubulaire en quartz (2). Le four est disposé horizontalement et mesure 60 cm de long. Il est relié à un système automatique de régulation de la température (3). La température maximale du four est de 1100°C. Le réacteur en quartz, d'une longueur totale de 105 cm et d'un diamètre intérieur de 5,2 cm, est en partie placé à

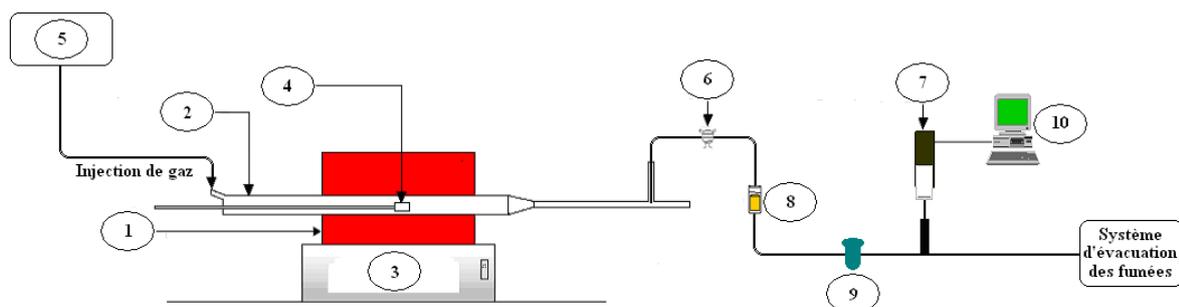


Figure 1 : Dispositif du réacteur tubulaire

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1 : Four | 2 : Réacteur tubulaire |
| 3 : Régulateur de température (résistance chauffante) | 4 : Nacelle porte-échantillon |
| 5 : Débitmètre massique BROOKS | 6 : Pompe |
| 7 : Analyseur de gaz (testoterm 350) | 8 : Filtre |
| 9 : Piège à eau (déshydrateur) | 10 : Ordinateur |

Tableau I : Composition élémentaire des sachets plastiques et du polyéthylène pur

| Eléments | Sachets de propylène | Propylène pur |
|------------------------|----------------------|-----------------|
| Carbone (C) | 73,8 % | 85,4 % - 86,4 % |
| Hydrogène (H) | 11,5 % | 13,5 % - 14,3 % |
| Azote (N) | 0,2 % | 0 % |
| Soufre (S) | 0,2 % | 0 % - 0,08 % |
| Oxygène (O) | 4,8 % | 0 % - 0,2 % |
| Chlore (Cl) | 300 ppm | 0 ppm |
| Eau (H ₂ O) | 2,5 % | - |
| Cendres | 6,7 % | 0 % |

Tableau II : Bilan des conditions expérimentales pour les granulés

| Température (°C) | Masse (mg) | Excès d'air (e) | Temps de séjour (s) |
|------------------|------------|-----------------|---------------------|
| 900 | 50 | 2,6 | 1,5 |
| 900 | 100 | 1,3 | 1,5 |
| 900 | 200 | 0,7 | 1,5 |
| 1000 | 50 | 2,4 | 1,5 |
| 1000 | 100 | 1,2 | 1,5 |
| 1000 | 200 | 0,6 | 1,5 |
| 1100 | 50 | 2,2 | 1,5 |
| 1100 | 100 | 1,1 | 1,5 |
| 1100 | 200 | 0,5 | 1,5 |

Tableau III : Bilan des conditions expérimentales pour les sachets plastiques

| Température (°C) | Masse (mg) | Excès d'air (e) | Temps de séjour (s) |
|------------------|------------|-----------------|---------------------|
| 900 | 50 | 2,1 | 1,5 |
| 900 | 100 | 1,1 | 1,5 |
| 900 | 200 | 0,6 | 1,5 |
| 1000 | 50 | 2,1 | 1,5 |
| 1000 | 100 | 1,0 | 1,5 |
| 1000 | 200 | 0,5 | 1,5 |
| 1100 | 50 | 1,9 | 1,5 |
| 1100 | 100 | 1,0 | 1,5 |
| 1100 | 200 | 0,5 | 1,5 |

l'intérieur du four. Une nacelle porte échantillon en quartz (4) est utilisée pour l'introduction du combustible à l'intérieur du réacteur. Un thermocouple de type K est placé au centre du réacteur (encasté dans la nacelle porte échantillon lors de sa conception) afin d'y connaître la température. La régulation du débit du comburant (air) est réalisée par un boîtier de contrôle numérique (CONTROLLER ELECTRONIC 0154) lié à un débitmètre massique (5), de marque BROOKS type 5850E, qui autorise un débit maximal de gaz de 30 Nl.mn^{-1} , avec une précision de mesure de l'ordre de 10^{-2} près. Une fraction des gaz issus de la dégradation est prélevée en continue à l'aide d'une pompe (6) et envoyée vers l'analyseur de gaz (7). Ces gaz passent à travers des filtres (8), en fibres de verre, qui éliminent les suies et goudrons, puis traversent un coffret (9) qui permet de piéger l'eau contenu dans les gaz, avant l'analyse par les cellules électrochimiques dont est équipé l'analyseur de gaz. L'analyseur de gaz est lié à un ordinateur (10), permettant l'acquisition des données via un bus RS 232. Le programme d'acquisition a été développé au laboratoire pour répondre aux besoins de ce travail. L'acquisition de l'ensemble des données est réalisée toutes les 3 secondes, afin de suivre l'évolution temporelle des différents polluants au cours de la dégradation.

3. Méthode

La procédure expérimentale de mise en place des essais avec le réacteur tubulaire est détaillée ci-dessous : nous fixons le débit de gaz vecteur (air) à la valeur désirée. Ensuite, nous programmons la température du four pour obtenir l'atmosphère souhaitée à l'endroit de la décomposition. Lors de cette étape la nacelle est préalablement retirée du four. Chaque échantillon à dégrader est pesé à l'aide d'une balance de précision à 10^{-2} mg près. L'échantillon est ensuite introduit dans le four à l'aide de la nacelle porte échantillon (en quartz). La nacelle est

introduite manuellement dans le four à une vitesse constante. Les gaz issus de la décomposition sont transportés vers l'analyseur de gaz. Les résultats sont traités par informatique en temps réel. Afin de conserver les mêmes conditions opératoires, la température de la nacelle porte échantillon est ramenée à $35 \pm 5^\circ\text{C}$ (elle est refroidie) après chaque test. Lors de nos expériences, les températures de dégradation sont fixées successivement à 900, 1000 et 1100°C selon les cas. Notre travail n'ayant pas pour enjeu l'étude de l'influence du temps de séjour, ce dernier a été pris constant (1,5 secondes) pendant toute la durée de l'expérience. Afin de vérifier la répétitivité des résultats, nous avons pour chaque condition, répété cinq fois les expériences. Les résultats présentés ci-dessous correspondent ainsi à la valeur moyenne de ces 5 tests. Lors des essais, l'erreur moyenne entre chaque test est comprise entre 4 et 8%.

4. Conditions expérimentales

Une analyse élémentaire des sachets plastiques en polyéthylène, a été effectuée afin de caractériser avec précision notre combustible. Pour cela, des échantillons ont été analysés pour le dosage des éléments majoritaires c'est-à-dire : carbone (C), hydrogène (H), oxygène (O), azote (N), soufre (S), chlore (Cl), eau (H_2O) 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. Les sachets en PE sont fabriqués à partir de granulés en PE, mais au cours du processus de fabrication, certaines molécules peuvent être ajoutées afin de modifier les propriétés physiques des sachets. Ainsi, nous avons réalisé au sein du tableau I, une comparaison des analyses élémentaires des sachets de PE et des granulés de PE pur, données par ^[12,24-26].

Au vu de ce bilan, nous constatons que les sachets en PE ont une composition chimique élémentaire différente de celle observée avec le polyéthylène pur. Les différences se situent surtout au niveau du taux de carbone, d'oxygène, de chlore et de cendres. Ces différences sont liées à l'ajout d'adjuvants. Afin de conduire à bien notre étude, différentes conditions opératoires ont été utilisées, en faisant varier la température de combustion et pour chacune, la masse de combustible. Les tableaux II et III indiquent les différentes conditions pour lesquelles les tests ont été effectués.

Dans ces tableaux, l'excès d'air représente le rapport du débit d'air réel injecté sur le débit d'air théorique stoechiométrique. Les températures ont été déterminées à partir des conditions classiquement rencontrées au sein des unités d'incinération des déchets, soit de 900 à 1100°C, [27]. La masse de combustible, exprimée en mg, est choisie de manière à éviter le phénomène de « combustible solide épais », c'est-à-dire l'établissement d'un gradient de température au sein du combustible lors de sa dégradation thermique. En effet, par définition, les sachets plastiques sont des combustibles fins, il convient alors pour la véracité de la comparaison des résultats que les granulés soient utilisés sous forme de combustible fin.

5. Résultats et interprétation

Sur les graphiques, le chiffre 50 signifie que la masse initiale de combustible est de 50 mg, 100 pour 100 mg et 200 pour 200 mg. Les espèces gazeuses dont nous avons suivi l'évolution, sont l'oxygène (O₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et le monoxyde d'azote (NO) : l'oxygène et le dioxyde de carbone sont des espèces dont l'évolution permet de suivre la qualité de la combustion. Dans nos conditions expérimentales, le monoxyde d'azote est l'un des polluants majoritairement formé lors de la combustion de matériaux à base de polyéthylène [14, 20, 21, 28, 29]. Les composés chlorés et soufrés tels que le gaz

chlorhydrique (HCl) et le dioxyde de soufre (SO₂) n'ont pas été analysés car les éléments chimiques : chlore (Cl) et soufre (S), sont présents dans les combustibles à l'état de traces [12,24-26,30]. Les précisions des mesures d'oxygène (O₂) et de monoxyde d'azote (NO) sont respectivement ± 0,2 % et ± 5 %. Ces précisions sont indiquées par le fabricant de l'analyseur de gaz dans le manuel d'utilisation. La teneur du dioxyde de carbone (CO₂) est calculée par rapport à l'oxygène mesuré par la formule :

$$CO_2 = \frac{CO_{2\max} \times (21\% - O_2)}{21\%}$$

CO_{2max} : Valeur de CO₂ maximale spécifique au combustible (en %) ;

21% : Teneur théorique, en oxygène (O₂) de l'air

O₂ : Valeur de O₂ mesurée dans les gaz (en %).

5.1. Evolution de la concentration d'oxygène résiduel en fonction de la température et de la masse

L'évolution du taux d'oxygène résiduel (en %) en fonction de la température et de la masse de combustible pour les sachets plastiques et les granulés de PE, est présentée dans la figure 2.

Quelle que soit la température de dégradation, la teneur en oxygène résiduel au sein des fumées diminue avec la masse, ce qui signifie que plus la masse de combustible augmente plus le besoin en oxygène s'impose. Cette évolution est logique puisque plus la masse augmente et plus la quantité de matière dévolatilisée est grande donc plus les réactions d'oxydation prennent place, générant une plus forte consommation d'oxygène ; ce qui se reflète dans les tableaux II et III par la baisse de l'excès d'aide en fonction de la masse. Si l'on analyse séparément chaque masse, alors nous constatons à 50 et à 100 mg, que plus la température est grande, plus la quantité d'oxygène consommée est grande avec de plus faibles teneurs

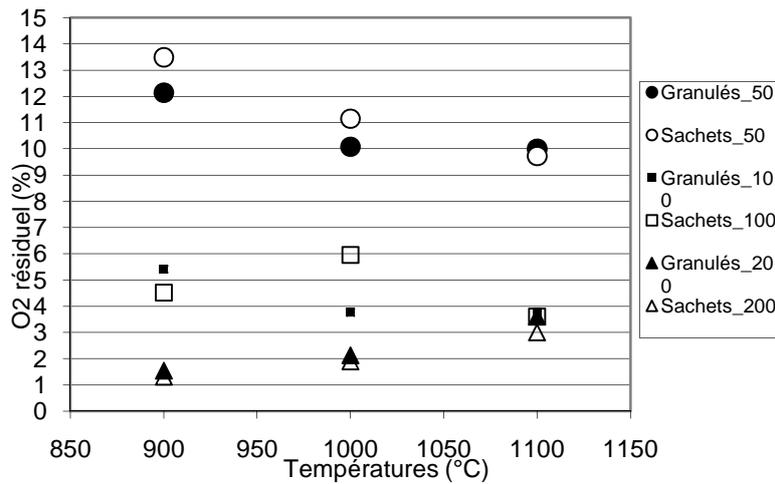


Figure 2 : Oxygène résiduel en fonction de la température et de la masse de combustible

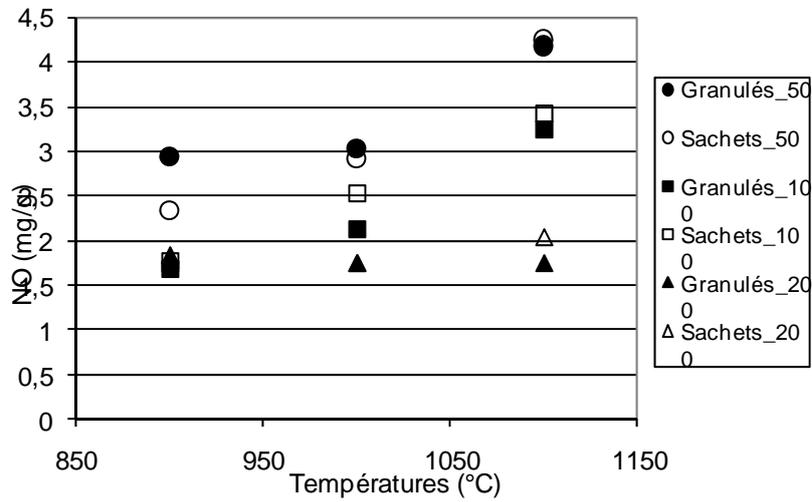


Figure 3 : Emissions de NO en fonction de la température et de la masse de combustible

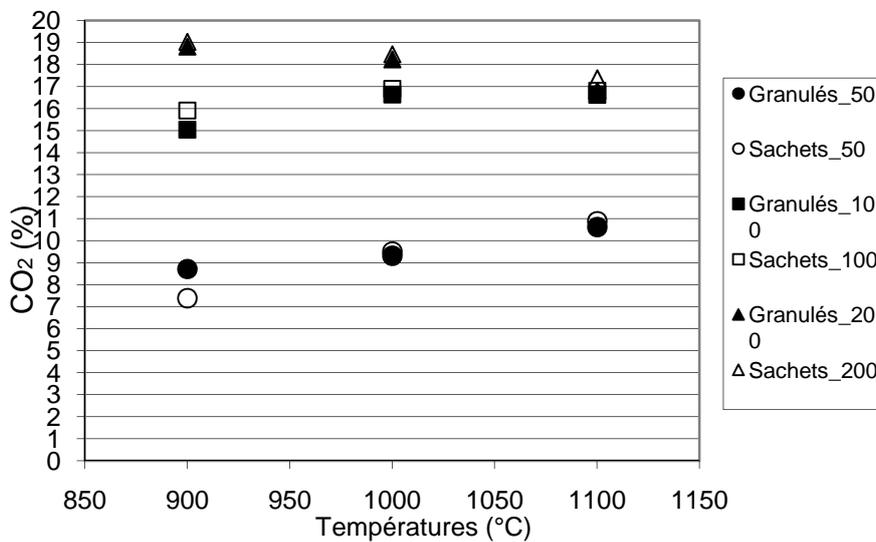


Figure 4 : CO₂ max en fonction de la température et de la masse de combustible

résiduelles en oxygène. Cette évolution est logique puisqu'une hausse de la température a un double effet :

- elle entraîne une plus forte dévolatilisation du combustible et ainsi une plus grande concentration en espèces volatiles à oxyder ^[16,17] ;
- elle favorise les réactions d'oxydation, donc la consommation d'oxygène, ^[14].

Pour la masse de 200 mg, la courbe présente une allure légèrement ascendante. Cette évolution, bien qu'elle soit dans un premier temps contraire à nos attentes, peut s'expliquer par le faible apport d'oxygène par rapport à la quantité de produits volatils (forte richesse c'est-à-dire faible rapport Comburant/Combustible, avec un taux d'oxygène résiduel dans les fumées compris entre 1 et 3%) : à cette masse, la combustion a lieu en milieu fortement réducteur ($e = 0,7 / 0,6 / 0,5$) ; le débit d'air comburant est tellement faible que la combustion devient alors non plus contrôlée par la concentration locale en oxygène et la cinétique chimique, mais par les phénomènes de diffusion et de transport de l'oxygène au sein du combustible [20, 31]. Concernant la comparaison des teneurs en oxygène résiduel entre les sachets plastiques et les granulés de PE, nous avons un écart moyen relativement faible, proche des 10%. Les émissions de O₂ lors de la combustion des sachets plastiques et des granulés sont ainsi sensiblement les mêmes.

5.2. Evolution des Emissions de NO en fonction de la température et de la masse

La figure 3 représente respectivement l'évolution des émissions de monoxyde d'azote (NO) en fonction de la température pour différentes masses de combustible, lors de la combustion des sachets plastiques et des granulés de Polyéthylène. Les émissions sont présentées en milligramme de NO par gramme de combustible dégradé.

De manière générale, les courbes d'émission de NO présentent une allure croissante lorsque la température de combustion augmente et cela quelle que soit la masse du combustible, exception faite du cas des granulés pour la masse de 200 mg. En effet, lorsque la quantité de matière volatile augmente (accroissement de la richesse du milieu réactionnel), le milieu réducteur s'installe, et peut être la cause de l'allure décroissante des courbes pour 200 mg de combustible brûlé. Une hausse de la température de combustion favorise l'oxydation des espèces gazeuses intermédiaires donc une plus forte consommation d'O₂. Les résultats observés avec ces courbes sont en accord avec ceux de ^[21,23,28,32]. Pour chaque température prise isolément, on remarque que lorsque la masse augmente, le taux d'émission de NO décroît. L'allure des courbes est normale et également fidèle à la formule du rendement du NO du combustible qui montre que les émissions de NO sont fortement dépendantes (fonction croissante) de la concentration locale en oxygène [14]. Ainsi, lorsque la masse augmente, la quantité de matière volatile (donc l'azote du combustible) provenant de la dégradation du combustible augmente, tandis que le débit d'air vecteur est fixe. La richesse du milieu réactif augmente au détriment de la quantité locale d'oxygène qui diminue. Cela se confirme lors de l'étude de l'évolution des concentrations en oxygène en fonction de la masse : nous remarquons une diminution de la teneur résiduelle en oxygène lorsque la masse croît. La comparaison des émissions de NO pour les deux combustibles, donc entre les granulés et les sachets, nous montre des écarts moyens d'environ 15%, avec des évolutions qui sont similaires. Ainsi, concernant les émissions de NO_x, il apparaît que les granulés en PE peuvent être utilisés en remplacement des sachets, avec un impact faible.

5.3. Emissions de CO₂ en fonction de la température et de la masse

Sur la figure 4, nous observons l'évolution du pourcentage volumique du dioxyde de carbone (CO₂) formé en fonction de la température et de la masse du combustible pour les deux matrices combustibles testées.

La littérature montre que si le dioxyde de carbone est un produit de dégradation du PE, il est, lors d'un processus de combustion, majoritairement obtenu par oxydation du monoxyde de carbone (CO) [33-38]. La quantité de CO₂ produite croît lorsque la masse augmente, et ce quelle que soit la température de combustion. Cette augmentation peut s'expliquer par le fait que plus l'oxygène est consommé plus l'oxydation du CO en CO₂ est favorisée. De plus, une augmentation de la masse de combustible, augmente intrinsèquement la concentration de carbone et donc de CO₂ dans les fumées. En effet, lorsque le carbone augmente la quantité d'hydrocarbure à oxyder en CO augmente d'où une augmentation CO₂ issu de l'oxydation du CO [16,17,39-41]. Nous observons également que pour les masses de 50 mg et de 100 mg, le CO₂ maximal croît avec la température. De même, les études menées par [15, 39], montrent que les émissions de CO₂ sont une fonction croissante de la température, puisque la vitesse de formation du CO₂ augmente considérablement en fonction de la température à partir de 830°C [40]. Le milieu réducteur qui s'installe lorsque la quantité de matière volatile augmente (accroissement de la richesse du milieu réactionnel), peut être la cause de l'allure décroissante des courbes pour 200 mg de combustible brûlé. En effet, les références [15-19] montrent que les réactions d'oxydation du CO humide sont fortement influencées par les phénomènes de transport, la température et la richesse du milieu réactionnel. Ainsi :

- plus la concentration locale en oxygène et la température augmentent, plus le CO va être oxydé en CO₂ ;

- plus la turbulence est forte, plus le transport est favorisé et plus le rendement de formation du CO₂ est fort.

La comparaison des émissions de CO₂ émises en fonction de la température et par type de combustible, montre des écarts très faibles. Ainsi, en ce qui concerne les émissions de CO₂, les sachets plastiques peuvent être remplacés par les granulés de polyéthylène pour des tests de combustion.

6. Conclusion

Outre l'effet de la masse et de la température sur les émissions gazeuses de NO, CO₂ et O₂, l'enjeu de notre étude était de comparer les émissions d'espèces gazeuses lors de la combustion de granulés de polyéthylène pur et de sachets plastiques à base de polyéthylène. Cette comparaison devrait permettre de savoir si oui ou non, pour des raisons de simplicité de mise en œuvre des expériences, les sachets plastiques à base de polyéthylène peuvent être substitués par les granulés de polyéthylène pur. Lors de nos essais, nous avons fait varier la température et la masse des échantillons, qui sont des paramètres influents de la combustion et notamment de la formation des polluants. Ces travaux ont été effectués à l'aide du four tubulaire. Au vu des résultats, il apparaît que, pour les masses de 50 et 100 mg, les écarts moyens des teneurs de NO et CO₂ émises sont faibles. De ce fait, nous déduisons que lors d'expériences concernant le NO et le CO₂, les granulés peuvent être utilisés en remplacement des sachets plastiques à base de polyéthylène.

Nous constatons également que :

- plus la masse de combustible augmente plus le besoin en oxygène s'impose.
- plus la température est grande, plus la quantité d'oxygène consommée est grande avec de plus faibles teneurs résiduelles en oxygène.

En conclusion, nous dirons que la masse et la température sont des paramètres influençant les significativement les émissions du NO, CO₂ et du O₂, lors de la

combustion de matériaux plastiques à base de polyéthylène. La comparaison des émissions gazeuses en fonction de la température et pour chaque masse de combustible brûlé, nous donne des écarts maximum de l'ordre de 15% lors des émissions des espèces gazeuses. Ces écarts n'étant pas importants, nous estimons qu'il est possible de substituer les sachets plastiques en faveur des granulés de PE lors d'expériences en laboratoire.

Bibliographie

- [1]. ADEME : «révision des plans départementaux d'élimination des déchets ménagers : loi 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets » ;
- [2]. Lebourg J. F., Maupin V., Rousseau D. : « La combustion des matières plastiques ». Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, T. E. N. 3, 1993-1994 ;
- [3]. Panagiotou T., Levendis Y. : « A Study on the Combustion Characteristics of PVC, Polyethylene, and Polypropylene Particles under High Heating Rates ». Combustion and flame, vol. 99, pp. 53-74, 1994;
- [4]. Panagiotou T., Levendis A. Y., Carlson J., Dunayevskiy Y. M., Vouros P. : « Aromatic Hydrocarbon Emission from Burning Polystyrene, Polyethylene and PVC Particles at High Temperatures » Combustion Science and Technology, vols. 116 – 117, pp. 91–123, 1996;
- [5]. Sodero S. F., Berruti F., Behie L. O. : « Ultra pyrolytic cracking of polyethylene – A high yield recycling method". Chemical Engineering Science, vol. 51, pp. 2805-2810, 1996»;
- [6]. Kawaguchi O., Ohtani T., Kojima H. : « Thermal decomposition Process of Polyethylene Pellet in a Hot stagnation Flow ». Combustion Science and Technology, vol. 130, pp. 411 – 421, 1997;
- [7]. Milne B. J., Behie L. A., & Berruti F. : « Recycling of plastics by ultra pyrolysis using an internally circulating fluidized reactor » Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 51, pp. 157-166, 1999;
- [8]. Minghui P., Shaogang C., Minghui Z., Xiaobai X. : « Characterization of the combustion products of Polyethylene » Chemosphere, vol. 39, n° 9, pp. 1497-1512, 1999;
- [9]. Levent Ballice. : « Classification of volatile products evolved during temperature programmed co-pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE) with polypropylene (PP) » Fuel, vol. , pp. , 2001;
- [10]. Chun T. L., Zhuang H. K., Hsieh L. T., Lee W. J., Tsao M. C. : « PAH emission from incineration of three plastic wastes » Environment International, vol. 27, pp. 61-67, 2001;
- [11]. Mastral F. J., Esperanza E., Garcia P., Juste M. : « Pyrolysis of high density polyethylene in a fluidised reactor : influence of the temperature and residence time » Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 63, pp 1 – 15, 2002;
- [12]. Wang Z., Wang J., Richter H., Howard J. B., Carlson J., Levendis A. Y. : « Comparative study on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Light Hydrocarbons, Carbon Monoxide, and Particulate Emissions from the combustion of polyethylene, Polystyrene and poly(vinyl chloride) » Energy & Fuels, vol. 17, pp. 999-1013, 2003;
- [13] Ouiminga S. K. : « Contribution à l'étude de la dégradation thermique des emballages plastiques souillés : cas des sachets plastiques transparents », Diplôme d'Etudes Approfondies en Physique Appliquée, 2004 ;
- [14] De Soete G. : « Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion » Revue générale de thermique, n°330-331, pp. 353-373, juin – juillet 1989 ;
- [15] Yetter R. A., Dryer F. L., Rabitz H. : « Complications of one step kinetics for moist CO oxidation » 21st international symposium on combustion, the combustion institute, pp. 749-760, 1986;
- [16] Yetter R. A., Dryer F. L., Rabitz H. : « A comprehensive reaction mechanism for carbon monoxide/hydrogen/oxygen

- kinetics » *Combustion Science and Technology* vol. 79, pp. 97-128, 1991a;
- [17] Yetter R. A., Dryer F. L., Rabitz H.: « Flow reactor studies of carbon monoxide/hydrogen/oxygen kinetics » *Combustion Science and Technology* vol. 79, pp. 129-140, 1991b;
- [18] Glarborg P., Kubel D., Kristensen P. G., Hansen J., Dam-Johansen K. : « Interactions of CO, NO_x and H₂O under post-flame conditions » *Combustion Science and Technology*, vol. 110-111, pp. 461-485, 1995;
- [19]. Roesler J. F., Yetter R. A., Dryer F. L. : « Kinetic interactions of CO, NO_x, and HCL emissions in post combustion gases » *Combustion and Flame* vol. 100 pp. 495-504, 1995;
- [20]. 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;
- [21]. Rogaume T., Auzanneau M., Jabouille F., Goudeau J. C., Torero J. L. : « Computational model to investigate the effect of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration » *Combustion Science and Technology*, vol. 175, pp. 1501-1533, 2003
- [22]. 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 ;
- [23]. Richard F., Rogaume T., Barhe A. T., Ouiminga S. K., Torero J. L., Rousseaux P. : « Influence of the regime of combustion on chemical pathways of NO_x formation during incineration of cellulosic and plastic materials » *Mediterranean Symposium on Combustion, MONASTIR, Tunisia, September 9-13 2007*;
- [24]. Wu C. H., Chang C. Y., Hor J. L., Shih S. M., Chen L. W., Chang F. W. : « On the thermal treatment of Plastic Mixtures of MSW : Pyrolysis Kinetics » *Waste Management*, Vol. 93, pp. 221, 1993;
- [25]. Wheatley L., Levendis Y. A., Vouross P. : « Exploratory Study on the Combustion and PAH Emission of Selected Municipal Waste plastics » *Environmental Science Technology*, Vol. 27, pp. 2885-2895, 1993;
- [26]. Tice P., « Polyethylene for Food Packaging Applications, Report prepared Under Responsibility of the ILSI Europe Packaging Material Task Force, 2003;
- [27]. Rogaume T. : « 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 ;
- [28]. Miller J. A., & Bowman C. T. : « Mechanism and modelling of nitrogen chemistry in combustion ». *Progress Energy Combustion Science* vol. 15, pp.287-338, 1989;
- [29]. Sorum L., Skreiberg O., Glarborg P., Jensen A., Dam Johansen K. : « formation of NO from combustion of volatiles from municipal solid wastes » ; *Combustion and Flame*, vol.123, pp. 195-212, 2001;
- [30]. Ouiminga S. K. : « Modélisation expérimentale et numérique de la combustion au sein des fours en argile : Influence des paramètres opératoires et de l'utilisation des déchets plastiques sur les émissions polluantes gazeuses », Thèse de doctorat de l'Université de Ouagadougou ; 2008 ;
- [31]. 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 ;
- [32]. Rogaume T., Richard, Jabouille, Torero J. L.: « Computational model to investigate the mechanisms of NO_x formation during waste incineration » *Combustion Science and Technology*, vol. 176, pp. 925-943, 2004;
- [33]. 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;
- [34]. Gardiner J. W. C., Olson D. B. « Chemical kinetics of high Temperature Combustion » Annual Reviews of Physical and Chemistry, vol. 31, pp. 377, 1980;
- [35]. Westbrook C. K., Dryer F. L., « Chemical kinetic modelling of hydrocarbon combustion ». Progress Energy Combustion Science, vol. 10, pp. 1-58, 1984;
- [36]. Glaborg P., Alzueta M.U., Dam-Johansen K., Miller J. A.: « Kinetic modelling of hydrocarbons / nitric oxide interactions in a flow reactor ». Combustion and Flame, vol. 115, pp. 1-27, 1998;
- [37]. Faravelli T., Frassoldati A., Ranzi E. : « Kinetic modelling of the interactions between NO and hydrocarbons in the oxidation of hydrocarbons at the low temperatures » Combustion and Flame, vol. 132, pp. 188-207, 2003;
- [38]. El Bakali A., Dagaut P., Pillier L., Desgroux P., Pauwels J. F., Rida A., Meunier P. : « Experimental and modelling study of the oxidation of natural gas in premixed flame, shock tube, and jet stirred reactor » Combustion and Flame, vol. 137, pp. 109-128, 2004;
- [39]. Glassman I. : « Combustion », Third edition, Academic Press, 1996;
- [40]. Dryer F. L., Naegeli D. W., Glassman I.: « Temperature dependence of the reaction $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ ». Combustion and Flame, vol. 17, pp.270-272, 1971;
- [41]. Brokaw R. S. : « Ignition kinetics of the carbon monoxide-oxygen reaction » 11th International Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 1063, 1967;
- [42]. Wargadalam V. J., Loffler G., Winter F., Hofbauer H. : « Homogeneous formation of NO and N₂O from the oxidation of HCN and NH₃ at 600-1000°C » Combustion and Flame, vol. 120, pp. 465-478, 2000.