

## Caractérisation du mélange combustible des déchets solides ménagers (DSM) de la ville d'Abomey-Calavi : Élaboration du déchet modèle

Melhyas Kplé<sup>1,\*</sup>, Guevara Nonviho<sup>2,3</sup>, Maurel Aza-Gnandji<sup>1</sup>, Vivien Doto<sup>1</sup>, Edem Chabi<sup>1</sup>, Gontrand Bagan<sup>1</sup>, Aristide Houngan<sup>3</sup>, Richard Agbokpanzo<sup>3</sup>, Pierre Girods<sup>4</sup>, Yann Rogaume<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire du Génie Rural, Université nationale d'Agriculture, 01 BP 55 Porto Novo, Bénin

<sup>2</sup>Unité de Recherche sur les Interactions Moléculaires, Laboratoire d'Etude et de Recherche en Chimie Appliquée de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi (URIM / LERCA / EPAC / UAC), 01 BP : 2009 Cotonou, Bénin

<sup>3</sup>Laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire pour l'Enseignement Technique (LARPET), Université Nationale des Sciences Technologie Ingénierie et Mathématiques, Lokossa BP 133, Bénin.

<sup>4</sup>Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois : LERMAB, 27 Rue Philippe Seguin, CS 60036, 88026 EPINAL cedex, Université de Lorraine, France

Reçu: 26 Février 2022 / Reçu dans sa forme révisée: 08 Mai 2022 / Accepté: 25 Mai 2022

### Résumé:

Les grandes villes africaines et les capitales en particulier, ont dans la plupart des cas connu une croissance rapide de leur population durant les quatre dernières décennies. Cette croissance, souvent exponentielle pose aux autorités publiques et aux décideurs de grands défis à relever dans la gestion des villes notamment dans le domaine de l'assainissement, de la collecte et du traitement des ordures ménagères (OM). C'est ainsi que la ville d'Abomey-Calavi est en train de mettre en place sa politique de gestion des OM.

L'objectif de cette étude est de faire la caractérisation physico-chimique des déchets solides ménagers (DSM) de la ville d'Abomey-Calavi. En effet, la mise en place d'un système efficace de traitement des OM exige une bonne connaissance des caractéristiques de ces déchets afin d'adopter les voies et les traitements les plus appropriés. Cependant, la grande hétérogénéité des DSM en rend la composition très complexe. Ainsi, la méthodologie adoptée dans la présente étude se base sur la proposition d'un déchet modèle pour aboutir à la détermination des paramètres physico-chimiques des DSM de la ville. Le combustible modèle basé sur la caractérisation typologique des déchets ménagers de la ville d'Abomey-Calavi selon chaque saison a montré que la fraction combustible des DSM secs de la ville est essentiellement constituée de matières organiques assimilables à un mélange constitué de 88% de bois, 7% de carton et 5% de plastique. Son taux d'humidité calculé est de 8,97% et son pouvoir calorifique inférieur (PCI) est de 18 684 kJ/kg.

Cette connaissance des proportions des constituants essentiels, permet d'avoir une idée d'ensemble sur les propriétés physico-chimiques du déchet de la ville. Cela permet en premier lieu d'orienter le choix des types de traitement à appliquer au déchet, et en deuxième lieu, de réduire le coût des études faites au laboratoire si elles étaient faites sur les déchets réels. Enfin, cette connaissance favorisera la maîtrise de la reproductibilité des expériences de laboratoire.

**Mots-clés:** DSM ; OM ; PCI ; Formule brute ; Analyse Thermogravimétrique.

\*Auteur correspondant:

Adresse e-mail: [melhyask@gmail.com](mailto:melhyask@gmail.com) / [christnel2@yahoo.fr](mailto:christnel2@yahoo.fr) (M. Kplé)

## 1. Introduction

Dans certaines grandes villes des pays africains, l'on assiste aujourd'hui à une gestion mieux pensée des déchets ménagers. C'est le cas par exemple de la ville de Ouagadougou au Burkina Faso où les autorités ont mis en place un Schéma Directeur de Gestion des Déchets.

Dans la ville d'Abomey-Calavi au Bénin, le système de gestion des déchets solides ménagers se réduit à la précollecte qui constitue le seul maillon fonctionnant, aucune action de collecte ou d'élimination n'étant opérationnelle. La gestion des déchets dans la commune ne répond à aucune planification. Elle est l'œuvre spontanée des acteurs qui agissent chacun en fonction de leurs intérêts immédiats. C'est donc une gestion hasardeuse et aléatoire qui s'observe. En effet, les déchets après la précollecte sont jetés aux abords des rues, ou pour fermer les bas-fonds. L'essentiel pour les populations étant de se débarrasser de leurs déchets. Ainsi des décharges sauvages sont installées sur des terrains et des sites choisis au hasard sans aucune précaution environnementale.

Pour permettre une gestion optimisée de ces déchets, une politique globale doit être mise en œuvre, mais elle ne peut reposer que sur des éléments concrets et démontrés par d'autres expériences qui ont réussi dans des contextes similaires. Il est ainsi primordial de mettre en place un plan d'action pour analyser le problème et ses caractéristiques, déterminer des voies de valorisation, tester différentes

solutions envisagées, puis optimiser les systèmes les plus viables.

Un combustible modèle est un combustible élaboré sur la base des éléments constitutifs des ordures à l'exemple de plusieurs travaux disponibles dans la littérature [1-8]; ce combustible modèle est généralement constitué de bois, de carton et de plastique. En effet, les travaux en laboratoire sur les déchets bruts sont non seulement coûteux, mais non représentatifs, car ayant une nature hétérogène, diversifiée et une durée de traitement assez longue.

Les déchets ménagers sont d'une composition variable suivant les saisons et les lieux de leur production. Dans le cas d'une région ou une ville, trouver une composition représentative des déchets nécessite des campagnes de caractérisation de ces déchets suivant les saisons, afin d'obtenir un modèle statistiquement valable. Les dernières campagnes de caractérisation des déchets de la ville d'Abomey-Calavi ont été effectuées par Topanou [9, 10]. Avec un taux d'humidité moyen de 68%, les résultats montrent que les déchets solides ménagers (DSM) de la ville d'Abomey-Calavi semblent plus favorables aux traitements biologiques (compostage, biométhanisation). En tenant compte de l'expérience des centres de traitement de Hèvié à Cotonou et de Tohoué à Porto-Novo (Bénin) et les expériences des usines de compostage en Afrique, il est clair que la production de compost reste uniquement possible avec la conception de systèmes intégrés. En effet, seule une partie des déchets est valorisable selon ces

procédés et la présence en forte quantité d'inertes pose un véritable problème. Outre une valorisation biologique des DSM de la ville d'Abomey-Calavi, il serait donc très important de mener des essais selon des procédés thermochimiques (combustion, pyrolyse, gazéification) afin d'évaluer les conditions de leur utilisation et de leur adaptation pour la ville.

Pour ce faire, une caractérisation du mélange combustible est indispensable et représente l'objectif principal de la présente étude. Il s'agira donc:

- de déterminer les paramètres de combustion des ordures ménagères de la ville d'Abomey-Calavi ;
- de proposer un mélange combustible modèle représentatif des DSM de la ville ;
- de déterminer des caractéristiques physico-chimiques des DSM de la ville (formule brute, PCI, composition élémentaire, analyse immédiate).

Par ailleurs, le modèle proposé dans ce travail se limitera à la fraction combustible des DSM de la ville d'Abomey-Calavi. Cela sous-entend qu'une phase préalable de tri serait

éventuellement nécessaire. Ce tri pourrait être réalisé en ôtant autant que possible la fraction des inertes, ce qui devrait conférer à la fraction restante une bonne aptitude à un traitement thermochimique, biologique ou les deux.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Détermination des paramètres de combustion

Dans le but d'analyser l'aptitude à la dégradation thermique ou thermochimique des déchets ménagers de la ville d'Abomey-Calavi, la détermination des paramètres de combustion a été effectuée sur la base de la composition des constituants des ordures ménagères brutes. Cette composition est basée sur la caractérisation typologique des DSM de la ville [9]. Les paramètres de combustion des DSM sont en général la fraction combustible, la fraction inerte et la quantité d'eau.

### 2.2. Composition du déchet modèle

Les constituants utilisés pour la composition du déchet modèle sont présentés dans la figure 1.



**Fig. 1.** Polyéthylène basse densité (PEBD) découpé (a) ; carton découpé (b) ; sciures et copeaux de bois (c).

L'hétérogénéité des déchets ne permettant pas leur étude en laboratoire, il est nécessaire de mettre en place un mélange combustible modèle, de composition la plus proche possible de celle des déchets ménagers, telle que définie par l'ADEME [11].

Sa composition tient compte de la part combustible des déchets ménagers pour le traitement thermo-chimique. Ainsi,

- les matières organiques sont assimilées au bois car chimiquement leur composition est proche de ce dernier (lignocellulosique);
- les cartons, papiers, textiles et textiles sanitaires sont assimilés au carton;
- les plastiques et les déchets spéciaux sont assimilés aux plastiques;
- les combustibles non classés sont assimilés à 50% de bois et 50% de plastiques;
- les composites sont assimilés à 50% de plastiques et 50% de carton.

Le bois utilisé se présente comme un mélange de sciures et de copeaux. Les plastiques considérés dans le déchet modèle de la présente étude sont uniquement le Polyéthylène (PE) car c'est la seule catégorie de plastique qu'on rencontre dans les poubelles domestiques dans la ville d'Abomey-Calavi. En raison, du recyclage poussé du Polyéthylène Haute Densité (PEHD : Bouteilles d'eau minérale) par les femmes dites Gohoto, le Polyéthylène basse Densité (PEBD) est l'unique déchet plastique utilisé dans la présente étude.

Le plastique et le carton sont découpés en carrés. Cette répartition de tailles permet de

garantir l'homogénéité du mélange combustible.

### 2.3. Dispositifs d'analyse pour la caractérisation des solides

Afin d'atteindre les objectifs fixés dans la présente étude, les constituants solides produits au cours des diverses étapes du procédé ont été caractérisés. Ainsi, l'humidité, la composition élémentaire, l'analyse immédiate et le pouvoir calorifique inférieur (PCI), de chaque type de combustible ont été déterminés.

#### 2.3.1. Mesure de l'Humidité des combustibles

Une masse  $m_{hi}$  de chaque composant du mélange combustible est pesée et portée à l'étuve pendant 48 heures au minimum afin que la masse ne varie plus (selon la norme NF EN 14774). La masse sèche  $m_{si}$  est pesée. L'humidité  $H_i$  de chaque composant et l'humidité globale  $H_g$  du mélange combustible sont déterminées par les équations (1) et (2).

$$H_i(\%) = 100 \frac{m_{hi} - m_{si}}{m_{hi}} \quad (1)$$

$$H_g = \sum P_i H_i \quad (2)$$

$P_i$  est la proportion du composant  $i$  dans le mélange combustible.

#### 2.3.2. Composition élémentaire des combustibles

Les différents constituants du déchet modèle que sont le bois, le carton et le

plastique sont essentiellement constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène. La composition élémentaire du déchet modèle se déduit de celles des combustibles constituant le mélange étalon et des proportions respectives de ceux-ci.

### 2.3.3. Analyse immédiate des combustibles

L'analyse immédiate a été réalisée par Analyse Thermogravimétrique (ATG) et permet de déterminer le taux de matières volatiles (MV), le taux de carbone fixe (CF) et le taux de cendres (TC) des combustibles utilisés selon les normes NF EN 14 775 et NF EN 15 148.

Le système utilisé est composé de trois parties essentielles que sont :

- un système de balance ; la perte de masse est mesurée au moyen d'un couple de rappel créé par une bobine d'induction, ce couple stabilise le fléau dans une position horizontale parfaite. En conséquence, la nacelle porte-échantillon se trouve toujours dans la même position dans le four, ce qui permet de s'affranchir des gradients de température éventuels ;
- un four constitué d'une résistance chauffante en graphite et d'un thermocouple à haute température ; la vitesse de montée en température peut être programmée entre 1 et 50 °C min<sup>-1</sup> ;
- un module contrôleur, composé d'un ensemble de cartes d'acquisition et de numérisation, assure le transfert et le traitement des données.

Le programme de montée en température sur la thermobalance pour la détermination de ces paramètres est le suivant :

- isotherme à 25 °C pendant 15 min;
- montée en température de 25 à 850 °C (3 °C min<sup>-1</sup>);
- isotherme à 850 °C pendant 30 min;
- combustion à 850 °C pendant 120 min.

Les courbes résultantes de cette programmation en température sont illustrées par le graphique de la figure 5.

La mesure du taux de cendre (TC) par cette méthode est peu précise pour les combustibles à faible teneur en cendres (comme le bois par exemple). Ainsi une autre méthode a été mise en œuvre pour améliorer la précision des résultats.

### 2.3.4. Détermination du taux de cendre (TC)

La teneur en résidus s'effectue en utilisant un creuset en platine, pour obtenir la calcination totale d'un échantillon. L'échantillon est brûlé à l'aide d'un four à moufle (à une température de 550 °C ou 815 °C) environ seize heures selon la norme NF EN 14 775. La masse du résidu incombustible est calculée par différence avec la pesée initiale (creusé vide) à 0,1 mg près. Le taux de cendres (en %) est donné par l'équation (3):

$$TC = \frac{m}{M} \times 100 \quad (3)$$

M est la masse de l'échantillon soumis à l'essai et m la masse de résidus obtenus.

### 2.3.5. Détermination du pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Les mesures à l'aide d'une bombe calorimétrique (Fig. 3) ont permis de déterminer expérimentalement le pouvoir calorifique supérieur (PCS) des produits initiaux et de leurs résidus après pyrolyse selon la norme NF EN 14 918.

Un échantillon anhydre de masse  $m_0$  (g) connue est disposé dans un creuset lui-même mis en place dans la bombe calorimétrique. Un fil de platine, de longueur connue et que l'on garde constante au cours des essais, est relié à deux électrodes de façon à être en contact avec le combustible. La bombe calorimétrique est fermée hermétiquement puis remplie d'oxygène pur à une pression de 20 bars afin de s'assurer que la combustion soit complète et rapide. La bombe calorimétrique est disposée dans un récipient adiabatique et est connectée au générateur de tension. Le bac calorifugé est finalement rempli d'une masse  $m_e$  (g) d'eau qui vient recouvrir la bombe. Le couvercle équipé d'un thermomètre et d'un mélangeur est disposé sur l'ensemble pour fermer le système. Après un temps de stabilisation, la température de l'eau est relevée et est notée  $T_0$  (°C). Par simple pression sur un déclencheur, un courant électrique est envoyé au travers du fil de platine qui s'échauffe et déclenche la réaction de combustion. L'énergie produite par la réaction exothermique de combustion se diffuse dans le système conduisant à l'élévation de la température de l'ensemble «bombe+eau». La température s'élève jusqu'à atteindre un

maximum que l'on note  $T$  (°C). La température moyenne de l'eau au cours de l'essai doit être la plus proche possible de la température ambiante afin de limiter les échanges avec l'extérieur.

A partir des résidus issus des différents types de traitements, des pastilles d'environ 500 mg sont constituées et conservées à l'étuve pendant au moins 48 heures à 103 °C. Deux ou trois essais sont réalisés pour chaque type de résidu. La masse d'eau  $m_e$  (g) est fixée à 2000 g. La bombe calorimétrique donne par lecture directe la valeur du PCS du combustible en  $\text{kJ kg}^{-1}$ .

Les échantillons à tester, d'environ 500 mg sont constitués et conservés à l'étuve pendant au moins 48 heures à 103 °C. Deux ou trois essais sont réalisés pour chaque type de combustible.

Le PCI ( $\text{kJ kg}^{-1}$  de combustible humide) est calculé à partir du PCS ( $\text{kJ kg}^{-1}$  de combustible sec), du pourcentage massique d'hydrogène (donné par les analyses élémentaires) et de la teneur en eau dans le combustible par l'équation (4).

$$PCI_{humide} = (PCS - 226 \times \%H) \left( \frac{100 - h_{brut}}{100} \right) - 25h_{brut} \quad (4)$$

Avec,  $h_{brut}$ , l'humidité sur brut de l'échantillon (%) (masse d'eau/masse de bois humide) ;  $\%H$ , le pourcentage massique d'hydrogène dans le combustible sec.

Les échantillons étant maintenus anhydres,  $h_{brut} = 0$ , l'équation (4) devient :

$$PCI_{sec} = PCS - 226 \times \%H \quad (5)$$

La détermination du PCI du déchet solide ménager réel a été effectuée de façon théorique conformément à l'équation (6). Tous les autres paramètres ont été déterminés expérimentalement.

$$PCI = 40(P + T + B + F) + 90R - 46W \quad (6)$$

Où  $W$  représente l'humidité moyenne des déchets (%) et  $P, T, B, F, R$  les teneurs (en %) respectivement des fractions papier, textile, déchets verts, fermentescibles et plastique [12 - 14].

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Diagramme triangulaire

Les déchets ménagers de la ville d'Abomey-Calavi sont constitués de matières combustibles, de matières inertes (résidus métalliques, sable, déchets des travaux publics, etc.) et d'eau. La nature et la proportion de ces trois fractions confèrent aux déchets leurs caractéristiques thermiques :

- la fraction combustible composée principalement de carbone (C) et d'hydrogène (H) ; dans cette fraction, seulement une part peut être valorisée par compostage ;
- la fraction inerte regroupe les matières minérales contenues dans les déchets (verre, métaux, terre, etc.) et les résidus de combustion ;
- l'humidité qui est un paramètre déterminant dans la combustion à l'air.

Les détails de la composition typologique des déchets ménagers de la ville d'Abomey-Calavi sont consignés dans le tableau 1.

Le tableau 2 regroupe les paramètres de traitement thermo-chimique des Ordures Ménagères (OM) de la ville d'Abomey-Calavi pour les deux campagnes de caractérisation réalisées par Topanou [9, 10]. Il s'agit de la fraction combustible, du taux d'inertes et de l'humidité. Ces paramètres ont été déterminés en considérant les éléments combustibles et les éléments inertes dans le bilan des catégories. La figure 2 illustre l'emplacement des points correspondants à ces valeurs dans le diagramme de combustion des ordures ménagères. Il ressort de ce graphique qu'aucun des points représentatifs de la composition des ordures ménagères en saison sèche comme en saison humide n'est inscrit dans la zone de combustion, donc les déchets d'Abomey-Calavi ne satisfont pas aux conditions nécessaires à leur dégradation directe par combustion.

Ceci est dû au fait que les déchets solides ménagers de la ville d'Abomey-Calavi ont une importante humidité moyenne (68,8%) due :

- à une mauvaise gestion des déchets à la source surtout au niveau des habitations de moyens et bas standing ;
- à une proportion de putrescibles (feuilles vertes de jardin et des aliments dont les composantes principales sont des fruits, légumes et des restes de nourriture) très importante (51% en moyenne) qui est la principale source d'humidité dans les déchets.

Ainsi, le traitement thermochimique des DSM d'Abomey-Calavi ne serait possible qu'après la mise en place d'une gestion bien pensée qui contribuerait à l'obtention d'une humidité inférieure à 50%. Dans cette filière de gestion des DSM, il faudra inclure un tri à la source comprenant d'une part, les putrescibles favorables à un traitement biologique et les autres catégories combustibles (plastique, carton, papier, etc.) d'autre part. La faible proportion de la matière fermentescible (4,6%) dans les DSM de la ville de Nouakchott a

entraîné une humidité faible et un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) élevé (11% et 11085 kJ/kg) où les Matières Organiques (MO) sont récupérées au niveau des ménages et valorisées comme aliment pour le bétail [12, 15, 16]. En effet, la matière fermentescible se décompose vite et occasionne une forte humidité dans les déchets. Par ailleurs il pourrait aussi être mis en place un dispositif de séchage naturel des déchets avant leur traitement thermochimique par utilisation de l'énergie solaire.

**Tableau 1**

Typologie moyenne des déchets de la ville d'Abomey-Calavi [9, 10].

Type de déchet	Saison sèche	Saison pluvieuse	Moyenne
Fermentescibles	48,64	53,50	51,07
Sable	34,50	19,64	27,07
Carton Papier	1,14	1,76	1,45
Matière plastique	2,69	2,75	2,72
Verre	1,50	1,45	1,47
Métal	1,04	1,44	1,24
Textiles	2,28	2,79	2,54
Autres	8,23	16,67	12,45

**Tableau 2**

Paramètres de combustion.

Catégories	Saison sèche		Saison humide	
	Sans fines	Avec fines	Sans fines	Avec fines
Fraction combustible %	26,08	17,08	23,61	18,97
Proportion inerte (%)	5,13	14,12	7,59	12,23
Proportion d'eau (%)	68,80	68,80	68,80	68,80



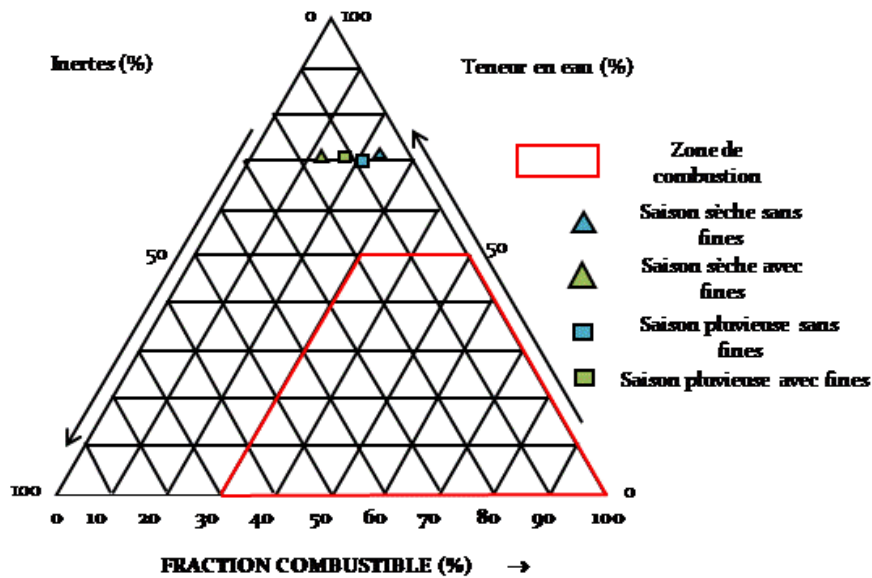


Fig. 2. Diagramme triangulaire de la composition des OM d'Abomey-Calavi.

### 3.2. Déchet modèle DM

Sur la base des hypothèses citées à la section 2.2., la composition du déchet modèle obtenu pour la ville d'Abomey-Calavi est résumée dans le tableau 3.

Ainsi, le déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi se compose de 88% de bois; 7% de carton et 5% de plastique. Pour le plastique, il est important de connaître la nature même de celui-ci car cela influe fortement sur la combustion et possiblement sur la pollution ou la corrosion ; par exemple, le PVC conduit à des dégagements de HCl ou de dioxines. Le tableau 4 fait la synthèse des compositions des mélanges expérimentaux utilisés par certains auteurs en comparaison de celui de la présente étude.

L'analyse du tableau 4 montre que les déchets modèles élaborés pour la France et pour la ville de Ouagadougou au Burkina Faso ont une quantité de bois plus faible que celui de la

présente étude. En revanche, ces déchets modèles ont des quantités plus élevées en carton et en plastique que celui de la présente étude. Ces différences s'expliquent par le fait que les déchets de la ville d'Abomey-Calavi ont une proportion très forte de matières putrescibles. De plus, ces déchets ne renferment pas certaines typologies telles que les déchets spéciaux, les combustibles non classés et les composites qui sont assimilés en proportion au carton et au plastique.

Les plastiques considérés dans le déchet modèle de la présente étude sont uniquement le Polyéthylène (PE) car c'est la seule catégorie de plastique qu'on rencontre dans les poubelles domestiques dans la ville d'Abomey-Calavi. Ainsi, seul le Polyéthylène basse Densité (PEBD) sera le déchet plastique considéré dans la présente étude. Les raisons ont déjà été évoquées plus haut.

**Tableau 3**

Composition centésimale du déchet modèle.

	Bois	Carton	Plastique	Total
Masse (%)	51,07	3,98	2,72	57,77
Proportion (%)	88,40	6,89	4,71	100,00
Proportion utilisée (%)	88	7	5	100

**Tableau 4**

Composition de différents mélanges expérimentaux [1, 5-7, 17].

Composition	Ouagadougou		France		Présente étude
-	[2]	[18]	[5]	[1]	-
Bois (%)	53	54	41	43	88
Carton (%)	25	24	37	32	7
Plastique (%)	22	22	22	25	5

### 3.3. Caractérisation des DSM de la ville d'Abomey-Calavi

#### 3.3.1. Composition élémentaire et analyse immédiate du déchet modèle

Tout comme Rogaume [5] et Nzhiou [2], la composition de bois retenue pour la présente étude est celle de Beaumont [19]. La composition élémentaire de ces trois principaux constituants des déchets ménagers est donnée par le tableau 5.

La composition élémentaire du déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi se déduit de celles des combustibles constituant le mélange combustible et des proportions respectives de

ceux-ci (88% pour le bois, 7% pour le carton et 5% pour le plastique). Le tableau 6 donne les récapitulatifs des résultats de la composition élémentaire du déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi. Le tableau 7 présente les résultats des analyses immédiates : taux de Matières Volatiles (MV), Carbone Fixe (CF), Taux de Cendre (TC) et Taux d'Humidité des différents combustibles déterminés par Analyse Thermogravimétrique (ATG) avec la thermobalance NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. La figure 3 illustre les résultats d'un essai par Analyse Thermogravimétrique pour l'Analyse immédiate des combustibles.

**Tableau 5**

Analyse élémentaire des matières sèches [17, 19].

Nature du combustible	C%	H%	N%	O%	S%	Cl%	Cendres %
Bois	50,9	5,76	0,2	42,1	0,04	0	1
Carton	43,73	5,7	0,09	44,93	0,21	0	5,34
Plastique	73,8	11,5	0,2	4,8	0,2	2,8	6,7

**Tableau 6**

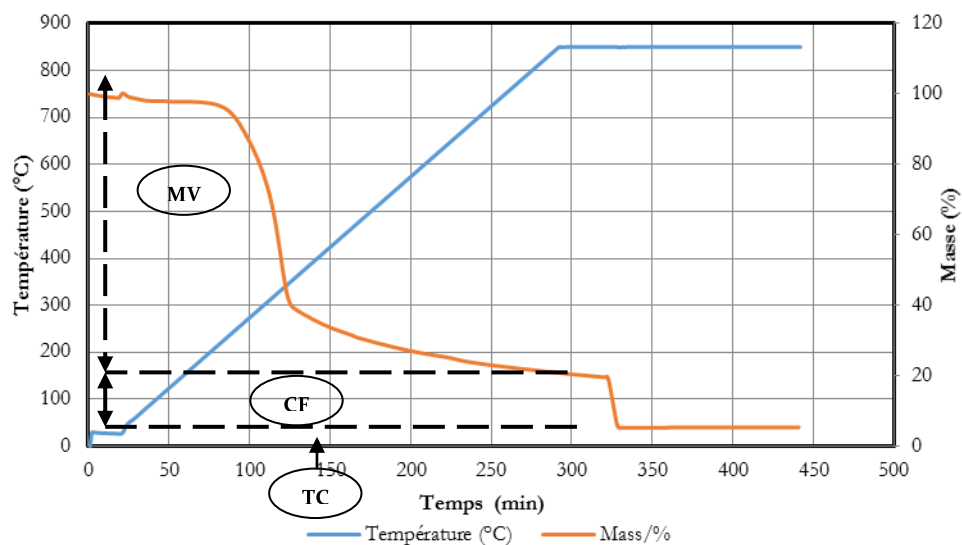
Composition élémentaire du déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi.

Nature du combustible	C%	H%	N%	O%	S%	Cl%	Cendres %	Total (%)
Bois	44,79	5,07	0,18	37,05	0,04	0,00	0,88	88
Carton	3,06	0,40	0,01	3,15	0,01	0,00	0,37	7
Plastique	3,69	0,58	0,01	0,24	0,01	0,14	0,34	5
Total (%)	51,54	6,04	0,19	40,43	0,06	0,14	1,59	100

**Tableau 7**

Analyse immédiate des combustibles bruts.

	PE	Carton	Bois	DM EXP (%)	DM CALC (%)
MV (%)	97,72	81,93	80,43	75,32	81,40
CF (%)	0,71	7,45	14,20	18,40	13,05
TC (%)	1,57	10,62	5,37	6,28	5,55
Humidité (%)	1,00	6,70	9,60		8,97



**Fig. 3.** Caractérisation des combustibles.

### 3.3.2. Formule brute approchée et PCI du mélange combustible de la ville d'Abomey-Calavi

Le tableau 8 donne le récapitulatif des nombres de moles d'atomes de chaque élément présent dans le mélange combustible de la ville d'Abomey-Calavi et le PCI<sub>sec</sub> de chaque constituant. L'analyse de ce tableau montre que le déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi est majoritairement composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Le chlore provenant essentiellement des adjuvants du sachet plastique a été négligé. En effet, les analyses élémentaires de sachets plastiques réalisées par Ouiminga [17] ont révélé que ceux-ci contenaient 300 ppm de chlore. Les essais réalisés au microanalyseur du PEBD n'ont pas mis en évidence d'atomes de chlore. Les PCI des divers combustibles ont été déterminés par bombe calorimétrique. Ainsi, la formule brute approchée du mélange combustible d'Abomey-Calavi est :  $C_{4,295}H_{6,043}O_{2,527}N_{0,014}S_{0,02}$ . Cette formule brute s'écarte de celle trouvée par

Nzhiou [4] ( $C_{7,2}H_{0,01}N_{0,02}O_{6,22}S_{0,08}$ ) pour le cas de la ville de Ouagadougou dont le déchet modèle se compose de 53% de bois, 25% de carton et 22% de plastique (avec 19% de PET et 3% de Polyamide 6-6). En effet, cette différence s'explique par le fait que les compositions des deux déchets modèles diffèrent en quantités de constituants (88% de bois, 7% de carton, 5% de plastique pour Abomey Calavi dans la présente étude, et 53% de bois, 25% de carton, 22% de plastique pour Ouagadougou). Cette différence pourrait également s'expliquer par la nature des plastiques utilisée dans les deux cas : PEBD pour Abomey Calavi, PET et Polyamide 6-6 pour Ouagadougou. En passant à l'unité de mole d'atome de Carbone, on a  $CH_{1,4}O_{0,6}N_{0,003}S_{0,0004}$ . Cette formule est très proche de celle du bois  $CH_{1,395}O_{0,645}N_{0,002}$  proposée par Strehler [20]. Cette formule confirme une fois de plus que le déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi est très proche de celle du bois.

**Tableau 8**

Nombre de moles d'atomes des constituants du Déchet Modèle et PCI<sub>sec</sub>.

Nature du combustible	C%	H%	N%	O%	S%	PCI <sub>sec</sub> (kJ/kg)
Bois	3,73	5,07	0,01	2,32	0,00	17572
Carton	0,26	0,40	0,00	0,20	0,00	14232
Plastique	0,31	0,58	0,00	0,02	0,00	42861
Déchet Modèle	4,30	6,04	0,01	2,53	0,00	18684

### 3.3.3. Validation du modèle

Le tableau 9 donne certaines caractéristiques physico-chimiques des déchets modèles et bruts (anhydres) de la ville d'Abomey-Calavi.

L'analyse de ce tableau montre que les valeurs données par les deux premières lignes (Matières solides volatiles, taux de carbone fixe et taux de cendre) sont éloignées. Cette situation s'explique par le fait que ces paramètres ont été déterminés sur broyats d'échantillons bruts (partie combustible et inertes). Ce qui diminue considérablement le taux de volatils et augmente le taux de cendre et d'inertes dans le mélange. Par ailleurs, les valeurs obtenues pour les PCI sont assez proches, ce qui montre d'une part que le modèle utilisé pour le calcul théorique du PCI du mélange combustible brut est valable. D'autre part, ces résultats montrent que les hypothèses (déjà utilisées pour des études en France et au Burkina) et utilisés pour l'élaboration du déchet modèle de la ville d'Abomey-Calavi sont acceptables.

**Tableau 9**  
Caractérisation des déchets brut et modèle.

	DM	Déchets bruts
MV (%)	75,32	59,05 [10]
TC +CF (%)	24,68	40,95 [10]
PCI (kJ/kg)	18684	17765

## 4. Conclusion

Le présent travail s'est proposé de faire la caractérisation des DSM de la ville d'Abomey-Calavi dans le but d'étudier les conditions d'application des traitements thermo-chimiques (combustion, pyrolyse, gazéification) à ces déchets. L'humidité de 68% représente un frein pour le traitement thermo-chimique. Cependant, il pourrait aussi être mis en place un dispositif de séchage des déchets avant leur traitement thermo-chimique. Cette étude s'est basée sur l'élaboration d'un mélange combustible pour pallier les contraintes relatives à l'utilisation des déchets réels au laboratoire. Ce mélange combustible est constitué de 88% de bois, 7% de carton et 5% de plastique. Ces proportions ont été déterminées à partir de campagnes de caractérisation typologiques des DSM de la ville d'Abomey-Calavi et des hypothèses mises en place par l'ADEME [11]. Ces hypothèses ont déjà été utilisées pour des travaux similaires en France et au Burkina Faso. Les caractéristiques physico-chimiques déterminées sur le DM anhydre montrent que l'application des traitements thermo-chimiques sur les DSM de la ville d'Abomey-Calavi est possible, à condition que des pré-traitements (séchage, tri, conditionnement, etc.) soient effectués.

Dans la perspective de valider les résultats obtenus dans ce travail, il est impératif de trouver les voies et moyens pour neutraliser les contraintes relatives à l'utilisation des déchets réels au laboratoire. Ceci permettra de tester les déchets solides ménagers réels au

laboratoire et d'éviter toute retenue sur la représentativité des déchets réels par des déchets modèles.

### Remerciements

*Cette étude n'aurait pas pu être effectuée sans le concours CPER « Région Lorraine » pour les équipements et instrumentations, le support financier du Labex Arbre, la mairie d'Abomey-Calavi. Les auteurs de ce manuscrit remercient ces organisations pour leurs soutiens.*

### Références bibliographiques

- [1] A.T. Barhe, 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 cellulosiques et plastiques, Thèse, Université de Poitiers, France (2004).
- [2] J.F. Nzhiou, Modélisation d'un four thermique rotatif, in *Energétique, Thermique, Combustion*, Thèse, Université de Ouagadougou, Burkina Faso (2005).
- [3] J.F. Nzhiou, *Improving Municipal Solid Waste Land Filling Disposal Process: Experiments with a laboratory Scale Rotary Kiln*. Journal of Environmental Protection 4 (2013) 753-759.
- [4] J.F. Nzhiou, T. Rogaume, B.G. Segda, J. Koulidiati, M. Bouda, *Contribution à la mise en place d'un modèle de la fraction combustible des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou*. Rev. CAMES Science et Médecine, série A 6 (2008) 7.
- [5] T. Rogaume, *Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants lors de l'incinération des déchets ménagers*, Thèse, Université de Poitiers, France (2001).
- [6] H. Salou, *Gestion des déchets ménagers dans les Pays En Développement : cas du Burkina-Faso. Dégradation thermique de leur fraction combustible*, Thèse, Université de Ouagadougou, Burkina Faso (2005).
- [7] J. Tezanou, *Evaluation environnementale et technique de la gestion des déchets ménagers de Ouagadougou : Schéma de gestion et Expérimentation de traitement thermique*, Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur : Energie, Thermique, Combustion, Thèse, Université de Poitiers, France (2003).
- [8] J. Tezanou, J. Koulidiati, M. Proust, M. Sougoti, J.-C. Goudeau, P. Kafando, T. Rogaume, *Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso)*, Annales de l'Université de Ouagadougou (2001).
- [9] N. Topanou, M. Domeizel, F. Jacques, R.G. Josse, T. Aminou, *Characterization of Household Solid Waste in the Town of Abomey-Calavi in Benin*, Journal of Environmental Protection 2 (2011) 692-699.
- [10] N. Topanou, *Gestion des déchets solides ménagers dans la ville d'Abomey-Calavi (Bénin): Caractérisation et essais de valorisation par compostage - Chimie de l'environnement, Chimie des déchets*, Thèse, Université d'Abomey-Calavi-Université d'Aix Marseille (2012).
- [11] ADEME, *La collecte et le traitement des déchets*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, France (1996).
- [12] S.O. Aloueimine, G. Matejka, C. Zurbrugg, M. Sidi, *Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 1 : Méthode d'échantillonnage*, Déchets – Rev. Francoph. Ecol. Industr. 44 (2006) 4-8.
- [13] S. Kathirvale, M.N. Muhud Yunus, K. Sopian, A.H. Samsuddin, R.A. Rahman, *Modeling the heating value of Municipal Solid Waste*, Fuel. 82 (2003) 1119-1125.
- [14] D. Wilson, A. Whiteman, A. Tormin, *Strategic Planning Guide For Municipal Solid Wastes management*. The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, Version 2 (2001).
- [15] S.O. Aloueimine, G. Matejka, C. Zurbrugg, M. Sidi, *Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 2 : Résultats en saison sèche et en saison humide*, Déchets – Rev. Francoph. Ecol. Industr. 44 (2006) 9-13.

[16] S.O. Alouemine, Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : Contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision - Chimie et Microbiologie de l'eau, Thèse, Université de Limoge, France (2006).

[17] S.K. Ouiminga, 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, Université de Ouagadougou, Burkina Faso (2008).

[18] S. Hamidou, Gestion des déchets ménagers dans les Pays En Développement : Cas du Burkina Faso. Dégradation thermique de leur fraction combustible - Energétique, Thermique, Combustion, Thèse, Université de Ouagadougou, Burkina Faso (2005).

[19] O. Beaumont, La combustion du bois, Biomasse actualités 17 (1985).

[20] A. Strehler, *Technologies of wood combustion*, Ecological engineering 16 (2000) 25-40.