

Méthode de détermination du pouvoir calorifique des déchets ménagers de la ville de Bamako

Ibrahim Chicoda YATTARA^{1*}, Moussa Magara TRAORE¹,
Tamba CAMARA², Oumar HAMADOUN²

¹Laboratoire Dynamique des Systèmes et de Tribologie de l’École Normale d’Enseignement Technique et Professionnelle (ENETP) Kabala, Bamako, Mali

²Laboratoire Pluridisciplinaire des Sciences et Didactique des Sciences, École Normale Supérieure de Bamako (ENSup-Bamako) Quartier du Fleuve, Avenue 22 octobre, Porte 121, B.P 241, Bamako, Mali
Email : ybrahimchicoda@gmail.com

INFOS SUR L’ARTICLE

Historique de l’article:

Reçu le : 14 janvier 2024

Reçu en format révisé le : 1 octobre 2024

Accepté le : 05 Aout 2025

Mots-Clés : *Mots-clefs : Bamako, déchets ménagers, évaluation expérimentale, pouvoir calorifique, villes urbaines.*

Keywords : *Bamako, Household waste, experimental evaluation, calorific value, urban cities.*

RESUME

Le rythme trop croissant d’urbanisation des villes d’Afrique subsaharienne entraîne une production incontrôlée des déchets ménagers. La valorisation de ces déchets est une exigence capitale pour la préservation environnementale de ces villes urbaines. Cet article présente une méthodologie d’évaluation du Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI) des déchets ménagers de la ville de Bamako à partir d’un dispositif expérimental. La nécessité de sélectionner des déchets modèles pour les besoins expérimentaux d’un laboratoire est importante du fait de la nature très variée des contenus des poubelles et de l’absence de collecte sélective des déchets à la source. Cependant, vu l’hétérogénéité de ces déchets de la ville de Bamako, nous avons procédé à un tri des déchets en mettant en relief les aspects environnementaux. Cette pratique a révélé que les déchets ménagers traités sont constitués de papiers ou cartons d’emballage (26,1%), des débris de bois (18,7%), de feuilles secs (32,4%) ; de déchets de cuisine (11,6%) et de plastiques (11,2%) sur des masses initiales de 1,378 kg, 2,252 kg et 3,378 kg. Pour minimiser la production des gaz nocifs à l’environnement, nous avons procédé à une séparation de la partie plastique dans l’échantillon du déchet utilisé. Le dispositif expérimental est conçu et utilisé pour incinérer ces masses de combustible afin de déterminer les températures de l’eau du réservoir, des flammes de combustion et de celle des fumées. Ces données nous ont permis d’obtenir 37,564 MJ/kg comme pouvoir calorifique moyen (1 kg, 2kg et 3 kg) de masses de combustible (déchets ménagers). Cette valeur s’explique par les pertes de chaleur liées à la faible isolation de la chambre de combustion et de la non-maitrise de quantité de chaleur contenue dans les fumées. L’optimisation de la performance de ce dispositif expérimental simple peut être un moyen de valorisation des déchets ménagers à grande échelle dans la production d’énergie contribuant ainsi à améliorer la préservation de l’environnement.

Abstract:

Rapid urbanization in cities in sub-Saharan Africa is leading to uncontrolled production of household waste. The recycling of this waste is crucial for environmental protection in urban areas. This article presents a method for evaluating the Lower Heating Value (LHV) of household waste in the city of Bamako using an experimental setup. The need to select model wastes for laboratory experiments is important because waste

contents vary widely and there is no selective waste collection at the source. However, given the heterogeneity of waste in Bamako, we sorted the waste emphasizing environmental aspects. This process revealed that the treated household waste consisted of initial masses of packaging paper or cardboard (26.1%), wood waste (18.7%), dry leaves (32.4%), kitchen waste (11.6%) and plastics (11.2%) consisted of 1.378 kg, 2.252 kg and 3.378 kg. To minimize the production of environmentally

harmful gases, we separated the plastic component from the waste sample used. The experimental setup was designed for the combustion of these fuel masses and was used to measure the temperatures of the water in the reservoir, the combustion flames and the smoke. Using this data, we were able to determine an average calorific value of 37.564 MJ/kg (for 1 kg, 2 kg and 3 kg) fuel masses (household waste). This value could be explained by heat losses due to poor insulation of the combustion chamber and the inability to control the heat content in the smoke. Optimizing the performance of this simple experimental setup could be a way to recover household waste for energy production on a larger scale, thereby contributing to environmental protection.

I. INTRODUCTION

La gestion des déchets est une préoccupation majeure dans toute l'Afrique de l'Ouest, principalement dans les villes à la population croissante (Kple, 2015). C'est le cas de la ville de Bamako qui ne dispose pas d'un système bien organisé de gestion des déchets. Le Mali, vaste pays continental au cœur de l'Afrique de l'Ouest, est soumis à un climat tropical sec. Il est traversé par deux grands fleuves, le Niger et le Sénégal. Selon l'Indice de Développement Humain (IDH), le Mali est l'un des pays les moins développés dans le monde. Or, le lien entre énergie, manque d'assainissement et pauvreté, est toujours très étroit, car ni la population, ni les pouvoirs publics n'investissent pas de façon substantielle dans ces différents domaines. Avec une population d'environ 22 millions 395 mille 485 d'habitants en 2022 selon le 5^{ème} recensement de la population et de l'habitat (Institut National des Statistiques du Mali, insat-mali.org), le Mali connaît une très forte croissance de 3,6% par an (Insat, 2023). A cela s'ajoute un important exode rural qui alimente l'expansion incontrôlée des villes. Cette expansion rapide, avec des densités de population parfois très élevées et le manque évident de sensibilisation et de discipline en matière de gestion des déchets et de propreté de l'espace public, créent d'énormes problèmes d'urbanisme et d'assainissement. Le manque d'assainissement est un facteur de risque majeur pour la santé des Maliens. Elle touche principalement les populations pauvres, marginalisées et vulnérables, dont plus de la moitié souffrent de maladies chroniques liées au manque d'accès à un assainissement adéquat.

A plusieurs reprises au niveau international, la République du Mali s'est engagée politiquement en faveur de l'assainissement (Politique Nationale d'Assainissement). La Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain, tenue à Stockholm en 1972, a réuni des représentants de 113 pays. Il est considéré comme le début d'une consultation mondiale visant à aborder les questions environnementales.

Ainsi, cette rencontre historique a marqué le début d'une nouvelle ère de conscience qui n'a cessé de grandir depuis. Au cours de cette conférence, 26 principes ont été

développés pour inspirer et guider les efforts des peuples du monde pour protéger et améliorer l'environnement. Le sixième principe stipule que : « Les rejets de matières toxiques ou d'autres matières et les dégagements de chaleur en des quantités ou sous des concentrations telles que l'environnement ne puisse plus en neutraliser les effets doivent être interrompus de façon à éviter que les écosystèmes ne subissent des dommages graves ou irréversibles. La lutte légitime des peuples de tous les pays contre la pollution doit être encouragée. ». Il s'applique spécifiquement aux questions de gestion des déchets (Rojo, 2009).

La problématique de la gestion des déchets dans les villes urbaines est fortement liée à des facteurs démographiques, sociaux, économiques et de gouvernance. Les caractéristiques démographiques d'une ville ont une grande influence sur la production de déchets domestiques. Selon l'Institut Nationale de la Statistique du Mali, la population de Bamako est estimée en 2023 à 2,78 millions d'habitants. Le taux de croissance démographique à Bamako est d'environ 5 % selon la Banque mondiale-Mali (Mohamadou et al., 2021). Le facteur démographique pose l'impact de la forte augmentation de la population au cours de ces décennies associé à une forte migration de la population des zones rurales vers les grandes villes. Au Mali, la situation sécuritaire a beaucoup contribué à la concentration des populations dans les villes urbaines. Des montagnes d'ordures sont observées à travers les villes. Souvent, des incendies sont déclenchés dans ces dépôts d'ordures entraînant un dégagement de fumées blanches se propageant à travers les quartiers environnants. Cette situation a tendance à créer un sentiment de malaise chez les habitants de ces quartiers. On assiste ainsi souvent à des manifestations sociales nécessitant souvent l'intervention des forces de l'ordre. Depuis des décennies, l'état du Mali tente de trouver une solution à la problématique des déchets à travers ses institutions en charge de l'environnement. Plusieurs scénarios (mairie-voirie, particuliers de bonne volonté, sociétés privées sous contrat) ont été éprouvés. Une politique nationale d'assainissement a été élaborée dont son application est confrontée à des problèmes liés à la multiplicité des acteurs et intervenants, à l'insuffisance de coordination et l'incohérence des actions d'assainissement. La source de ces dépôts d'ordure à travers la ville de Bamako provient de l'aspect organisationnel de la gestion des déchets. En effet, d'un côté des petits Groupements d'Intérêt Economique (GIE) sont créés dans les quartiers pour le ramassage des ordures. Après la collecte, ces ordures sont déversées dans les dépôts de proximité. La chaîne de ramassage se limitant souvent à ces déversoirs, ce qui cause en grande partie l'augmentation continue du volume des dépôts de déchets en plein centre-ville. Selon l'Institut National de la Statistique du Mali (2021), la quantité moyenne de ces ordures déposées dans les décharges à Bamako est estimée à 3209,403 m³ par an. Cette étude est menée en commune VI dans le district de Bamako où le ratio moyen d'ordures ménagères produites est sensiblement égal à 0,28 kg par habitant et par jour

(Mohamadou et al., 2021). Ce rapport varie en fonction des différentes communes du district de Bamako. Ainsi le ratio est 0,31 kg/hbt/jour pour la commune I ; 0,30 kg/habitant/jour pour la commune II ; 0,23 kg/habitant/jour pour la commune III ; 0,33 kg/habitant/jour pour la commune IV et 0,21 kg/hbt/jour pour la commune V (Mohamadou et al., 2021).

Il est crucial de trouver des solutions efficaces pour la gestion durable des déchets face à ces défis.

La valorisation énergétique des déchets est une approche prometteuse qui vise à utiliser le pouvoir calorifique de ces derniers pour générer de l'énergie, ce qui permet de diminuer la dépendance aux énergies fossiles. Le Pouvoir calorifique d'un matériau est la quantité d'énergie qu'il peut libérer lors de sa combustion. Il est essentiel de prendre cette mesure afin de déterminer si les déchets ménagers peuvent être utilisés comme source d'énergie.

Dans les pays développés, la valorisation énergétique des déchets est largement répandue. Environ 40 % des déchets municipaux sont transformés en énergie en Europe (Liboiron et Vermeersch, 2017). Par contre, dans les villes d'Afrique subsaharienne, cette pratique est moins courante en raison de l'insuffisance des infrastructures et des ressources financières, ainsi que des caractéristiques des déchets, souvent riches en matières organiques et à forte teneur en eau (Citeretse, L., 2008). Leur potentiel calorifique est directement impacté par ces facteurs.

La plupart des déchets générés dans les zones urbaines en Afrique subsaharienne sont constitués de matières organiques, fréquemment liées à un niveau élevé d'humidité (Bosko, D. T. H., et Emile, P. T., 2020). Cela restreint la possibilité pour les villes de mettre en valeur ces déchets en utilisant des méthodes comme l'incinération ou la production de biogaz. De plus, les installations de collecte et de traitement sont fréquemment inadéquates, ce qui entraîne des décharges sauvages de déchets dans les rues et les cours d'eau. La croissance démographique rapide et l'urbanisation croissante des villes rendent de plus en plus impossibles l'utilisation des méthodes de gestion traditionnelles, telles que l'enfouissement.

Dans cette situation, la ville de Bamako fait face à de multiples difficultés en ce qui concerne la gestion de ses déchets domestiques. La majorité des déchets sont négligés et se retrouvent dans des décharges à ciel ouvert, ce qui pose des problèmes à la fois environnementaux et sanitaires. Il est donc essentiel de trouver des moyens de tirer parti du potentiel énergétique des déchets ménagers pour diminuer leur volume, préserver l'environnement et en extraire de l'énergie. L'objectif de cette recherche est de déterminer la capacité calorifique des déchets ménagers de Bamako, une étape essentielle pour évaluer leur potentiel de transformation en énergie.

Vu ces réalités d'une part et le déficit énergétique auquel le Mali est confronté chaque année durant la période de chaleur d'autre part, la détermination du pouvoir calorifique des déchets de la ville de Bamako est une alternative pour le renforcement de la production énergétique du pays et la préservation de l'environnement.

Cela permettra, à terme et à une échelle plus grande de valoriser les déchets ménagers des villes urbaines.

II. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les déchets ménagers de Bamako sont hétérogènes. Les coffres de Bamako contiennent toutes sortes d'ordures et de résidus, notamment des restes de nourriture, du plastique, du papier, du carton, des cendres, du sable, de la poussière, du charbon, des feuilles, du bois et des os. Ils représentent 99 % des déchets générés contre 0,4 % pour les déchets médicaux et 0,6 % pour les déchets industriels (Mohamadou et al., 2021). La valorisation des déchets devant passer par leur caractérisation, ce concept a fait l'objet de plusieurs études (Resse, 1998 ; Ammar, 2006 ; Elisa et al., 2014 ; Obame, 2021 ; Bah et al., 2021 ; Doumbia et al., 2022). Une approche de caractérisation basée sur un échantillonnage des déchets ménagers depuis les poubelles des ménages, réalisée à Nouakchott, en Mauritanie a révélé qu'il est généré 0,35 kg (Aloueimine, 2006) de déchets dont 60% en masse se retrouve dans les sites de transite gérés par les communes. Dans le but de proposer plusieurs filières de valorisation, une méthode d'échantillonnage et de quartage proposée par l'étude (Guermoud et al., 2014) à Mostaganem, en Algérie, a estimé que 0,825 kg de déchets est produit chaque jour par habitant dont 65,5% de matière organique, 13% de papier et de carton, 7% de plastique, 4% de verre, 3,5% de métaux, 3% de textile et 4% de divers. La caractérisation des déchets évolue. Cette évaluation est tributaire souvent de variation saisonnière et temporelle. Ce facteur est important et peut se transformer en contraintes par rapport à certaines voies de valorisation. Les déchets peuvent contenir jusqu'à 80% d'eau (Ngnikam et al., 2017) avec un impact contraignant sur le compostage. Le concept de recyclage étant traditionnellement compris comme la réinsertion des déchets dans le cycle économique, la valorisation énergétique doit être considérée comme une opération de recyclage (Manuel et al., 1997).

La biométhanisation, le compostage, l'incinération, la gazéification et la pyrolyse sont autant de modes de valorisation des déchets solides qui ont fait leurs preuves ailleurs (Gérard et al., 2001 ; Keller, 2009 ; Lebon, 2016 ; Lumani et al., 2016 ; Saïdi-Boulahia et al. 2018 ; Boukria et al., 2018 ; Soumaya, 2018 Ntalani et al., 2020 ; Iwunze, 2021 ; Mmehed, 2021). Cependant, en raison de son faible coût d'installation et de la technologie simple requise pour le compostage, c'est la méthode de recyclage la plus utilisée dans les pays en développement (Haouaoui et al., 2009 ; Boukria et al., 2018 ; Bouferrache, 2019 ; Zineb et al., 2020 ; Meciel et al., 2020 ; Fatiha et al., 2021 ; Laabidi, 2022). Au Cameroun, le compost produit par les stations de compostage artisanales ouvertes jusqu'à présent permet de produire des résultats tels que : la régénération les sols pauvres, l'amélioration de la croissance des plantes et des racines, la réduction de l'utilisation des engrains chimiques, de l'eau et des pesticides, l'augmentation de la rétention des nutriments dans le sol, la porosité du sol, l'amélioration de la capacité de rétention d'eau du sol, la

résistance à l'érosion éolienne et à l'érosion hydrique (Bisimwa et al., 2013). Aussi la fabrication des briquettes à partir de papier et de carton est un autre moyen de valoriser l'énergie des déchets. Quel que soit le mélange papier/carton-liant, toutes les briquettes produites à partir de papier ont un Pouvoir Calorifique Inférieur d'environ 14 MJ/kg (Baguian et al., 2021). Une étude (Baguian et al., 2021) menée au Burkina sur l'évaluation du Pouvoir Calorifique Inférieur des ordures ménagères a estimé que l'incinération des déchets peut servir de moyens de valorisation énergétique des déchets. A partir d'un déchet considéré comme modèle pour les pays en voie de développement, il s'agissait de déterminer le PCI de la fraction combustible à l'aide d'un dispositif (Baguian et al., 2021).

Il est essentiel de déterminer le pouvoir calorifique des déchets afin d'évaluer leur potentiel de valorisation énergétique. Différentes techniques permettent d'évaluer le pouvoir calorifique. Ces techniques se distinguent par leur précision, leur accessibilité et leur pertinence pour les différents matériaux étudiés.

La calorimétrie par bombe calorimétrique est la méthode la plus fréquemment employée pour évaluer le pouvoir calorifique. Il s'agit d'une technique qui implique la combustion d'un échantillon de déchets dans une enceinte hermétiquement fermée, connue sous le nom de bombe calorimétrique, sous l'eau. La chaleur produite lors de la combustion est transmise à l'eau environnante et la température augmentée est mesurée avec précision afin de déterminer l'énergie libérée par la combustion complète de l'échantillon (Lund, H., 2009). Les différentes étapes de cette méthode sont les suivantes : On insère un échantillon représentatif dans la bombe calorimétrique. La bombe est remplie d'oxygène à haute pression afin de garantir une combustion totale. On mesure l'augmentation de la température de l'eau autour de la bombe, ce qui permet de déterminer le pouvoir calorifique supérieur (PCS). On peut calculer le pouvoir calorifique inférieur (PCI) en déduisant l'énergie liée à la condensation de la vapeur d'eau produite lors de la combustion. Cette méthode est précise et largement utilisée dans l'industrie et la recherche pour évaluer la qualité énergétique des combustibles, y compris les déchets ménagers. Toutefois, elle nécessite un équipement sophistiqué et ne convient pas toujours aux pays ou aux régions disposant de moyens limités (Lund, H., 2009).

Les analyses proximate et ultimate sont aussi des techniques indirectes fréquemment employées en collaboration avec des modèles mathématiques afin d'évaluer le pouvoir calorifique. L'analyse proximate évalue l'humidité, les cendres, la matière volatile et le

carbone fixe. Il est possible d'utiliser ces paramètres afin d'estimer approximativement le PCI d'un matériau combustible (Shi, L., Zhang, X., Jiang, X., et Wu, J., 2016).

Pour notre étude, à la lumière de ces méthodes et en considérant qu'au cours de la combustion des déchets utilisés, la quantité d'eau liquide formée est négligeable (Déchets préalablement triés et taux d'humidité très faible). Par conséquent, la détermination concerne le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Le PCI et l'enthalpie des constituants du système permettent d'appliquer le principe de conservation de l'énergie de la quantité de chaleur (Baguian et al., 2021). De façon générale, dans un dispositif expérimental d'incinération, ce principe se traduit par :

$$m_{comb} * PCI + m_A * \Delta H_A = m_F * \Delta H_F + m_C * \Delta H_C + \text{Pertes thermiques} + \text{Pertes imbrûlées} \quad (1)$$

(Hamidou et al., 2013)

Où ΔH_A , ΔH_C et ΔH_F représente respectivement l'enthalpie de l'Air, des cendres et des fumées.

Le pouvoir calorifique pour une masse m_{comb} de combustible introduit dans le four de combustion est donné par la relation :

$$PCI = \frac{Q_{comb}}{m_{comb}} \quad (2)$$

(Hamidou et al., 2013)

Aussi l'énergie contenue (E) dans les déchets traités s'obtient sur la base de leur PCI :

$$E = q * PCI \quad (3)$$

(Hamidou et al., 2013)

Où q est la quantité de déchets utilisée en kg.

III. DESCRIPTION DU MATERIEL ET FONCTIONNEMENT

III.1. Description du dispositif test

Le dispositif expérimental de cette étude est un mini incinérateur (Fig.1). Il est formé d'un four de combustion dans lequel les déchets subissent une réaction de combustion. La chambre du four de combustion supportée par un trépied est solidairement soudée au réservoir du liquide à chauffer. La chambre du four dispose d'une conduite d'échappement de la fumée prolongée par un radiateur plongé dans un bac à eau dans

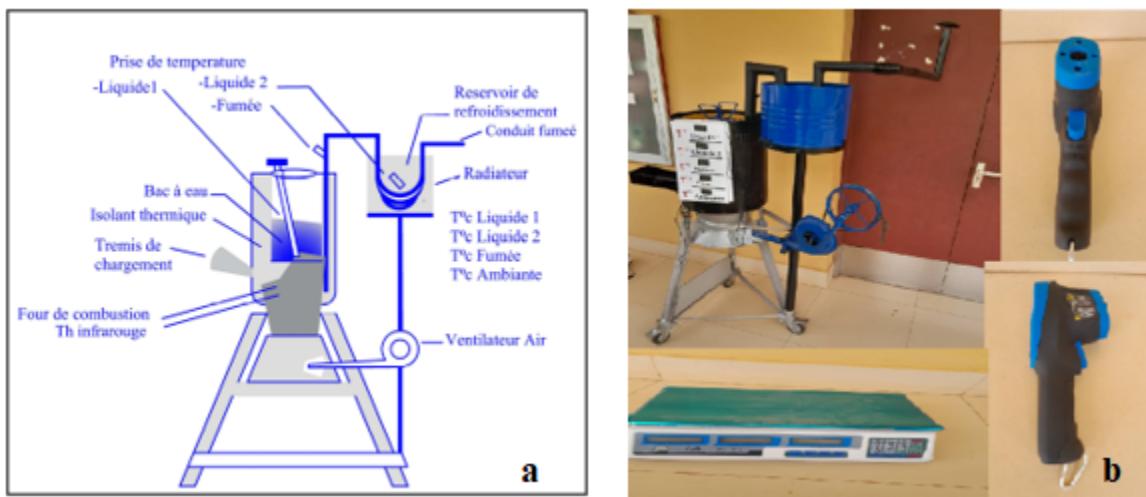


Fig. 1. Dispositif expérimental
a : Schéma du mini incinérateur
b : Image du mini incinérateur

lequel est placé une sonde de température qui témoigne du transfert de chaleur des fumées. Le four de combustion est isolé thermiquement et muni d'une trémie de chargement des déchets. La trémie de chargement, munie d'une fermeture, permet d'introduire les masses de déchets triés dans la chambre du four de combustion. Le bac réservoir de forme cylindrique est une bombonne à gaz remodelé et sur laquelle on adjoint une couche de terre cuite pour assurer l'isolation thermique. Une couche métallique entoure l'ensemble chambre de combustion et réservoir de liquide à chauffer pour assurer la sécurité de l'opérateur. L'eau de l'expérience est introduite par une ouverture située à la partie supérieure du réservoir disposant d'un couvercle maintenu fermé lors de l'expérience. Un dispositif de ventilation forcée est relié au four pour maintenir la combustion des déchets. Toutes les sondes sont reliées à un tableau de lecture accroché à la masse métallique de protection entourant l'ensemble four de combustion et bac de réservoir d'eau à chauffer. Une autre sonde est également placée à l'intérieur de la conduite d'échappement pour mesurer la température des fumées de combustion. En plus du dispositif, nous avons également utilisé une balance pour la mesure la masse des déchets, un thermomètre infrarouge (Fig.1b) calibré à 1500 °C portatif pour relever les températures des flammes de combustion, des parois (ou porte) et des cendres. A la fin de l'expérience, les cendres sont récupérées et pesées. Leurs masses sont déterminées ainsi que leur proportion en pourcentage par rapport à la masse expérimentale de déchets (sans les parties plastiques).

III.2. Mode de fonctionnement

Tout d'abord on introduit un volume d'un litre d'eau dans le réservoir et le bac du radiateur. Ensuite les déchets sont triés pour extraire les matières plastiques (Tableau1). Ils sont pesés à l'aide d'une balance pour déterminer la masse du déchet obtenu. La masse pesée est introduite dans le four à combustion et ensuite on procède à l'allumage à

l'aide d'une mèche pour déclencher la combustion des déchets. Les températures initiales (température de l'eau du réservoir, température du bac radiateur, température ambiante) sont relevées au début de l'expérience avant l'allumage de la masse de déchets. On procède à relever de façon continue les températures de la flamme à l'aide du thermomètre infrarouge ainsi que celles des paramètres cités ci-dessus à l'aide du tableau de lecture jusqu'à la fin de la combustion des déchets. Nous avons aussi effectué plusieurs expériences avec des masses différentes de déchets. Les données initiales pour l'expérimentation sont les valeurs relevées au début de l'expérience. Elles correspondent aux températures de l'eau du réservoir, du bac radiateur, ambiante, de la masse du déchet à brûler. Les flammes et les fumées sont initialement à la température ambiante. Les données finales sont les valeurs relevées à la fin de l'expérience. Dans cette étude, nous avons utilisé des déchets bruts composés uniquement de cartons, de bois et de feuilles mortes. Nous avons déduit des déchets utilisés les composantes plastiques. Pour l'élimination et la valorisation des déchets ménagers, nous avons procédé par incinération et détermination du bilan énergétique de tout le processus. L'incinération, étant définie comme un processus d'oxydation à haute température basé sur la combustion partielle des déchets en présence d'un excès d'air (Cheikiche, 2022). Les déchets sont brûlés dans un four à des températures très élevées. Cette destruction par le feu peut être obtenue en convertissant le résidu en gaz, en chaleur et en matériaux inertes (cendres et mâchefers). La chaleur dégagée par l'incinérateur est récupérée sous forme de vapeur et les fumées sont acheminées dans les tubes de la chaudière. La vapeur ainsi obtenue peut être utilisée dans un réseau de chauffage (pour usages industriels et domestiques). Elle peut également être appliquée dans un système thermodynamique pour la production d'électricité à travers l'entrainement d'un turbogénérateur.

III.3. Détail du bilan énergétique :

Nous déterminons un gradient de température ΔT de combustion des déchets, de l'eau du réservoir, de l'eau du bac radiateur et des fumées de combustion (la différence entre les valeurs finales et les valeurs initiales). L'équation du bilan énergétique qui traduit la relation suivante :

$$Q_{Comb} = Q_{R} + Q_{pf} + Q_{pi} + Q_{ps} + Q_{pp} + Q_{pr} \quad (4)$$

(Hamidou et al.,2013)

Où Q_{Comb} , Q_R , Q_{pf} , Q_{pi} , Q_{ps} , Q_{pp} et Q_{pr} représentent respectivement la quantité de chaleur contenue dans le combustible (déchets), reçue par l'eau du réservoir, perdue dans les fumées, perdue dans les imbrûlés combustibles, perdue dans les solides (cendres) imbrûlés, perdue dans les parois et perdue dans les résidus solides.

a - Calcul de la chaleur produite par la combustion des déchets

▪ Chaleur reçue par l'eau du réservoir:

Pour une expérience réalisée avec une masse (m_{Comb}) de 1kg de déchets, les valeurs initiales d'expérience sont :

- Température de l'eau du réservoir : $T_{i(c-r)} = 40,7^{\circ}\text{C}$;
- Température de l'eau du bac radiateur : $T_{i(c-b)} = 32,4^{\circ}\text{C}$;
- Température des flammes : $T_{i(f)} = T_{amb}$;
- Température des fumées : $T_{i(fum)} = T_{amb}$;
- Température ambiante : $T_{amb} = 29,2^{\circ}\text{C}$;

Les valeurs finales d'expérience relevées sont :

- Température de l'eau du réservoir : $T_{f(c-r)} = 130^{\circ}\text{C}$;
- Température de l'eau du bac radiateur : $T_{f(c-b)} = 34,4^{\circ}\text{C}$;
- Température des flammes : $T_{f(f)} = 159,2^{\circ}\text{C}$;
- Température des fumées : $T_{f(fum)} = 44,9^{\circ}\text{C}$;
- Température ambiante : $T_{amb} = 35,9^{\circ}\text{C}$

La Chaleur reçue par l'eau du réservoir est déterminée par :

$$Q_R = \sum m_{liquide1} * C_e * \Delta T \quad (5)$$

Où $\Delta T = T_f - T_i$ est le gradient de température entre l'état final et l'état initial ; C_e est la chaleur massique de l'eau ($C_e = 4,1868 \text{ kJ/kg. K}$).

A l'aide d'un tableur Excel, les gradients de température sont calculés ainsi que les différentes quantités de chaleur intervenant dans le bilan énergétique. Ainsi, la quantité de chaleur reçue par le liquide 1 pour une masse de 1 kg est :

$$Q_R = 31,053 \text{ MJ}$$

*Tableau 1. Composition élémentaire des déchets en pourcentage pour une masse initiale moyenne de 2 Kg
(Pour des raisons environnementales, les portions de déchets plastiques n'ont pas été utilisées dans la combustion)*

Composition élémentaire	Papiers ou cartons d'emballage	Débris de bois	Feuilles secs	Déchets de cuisines	Humidité
Teneur en %	26,1	18,7	32,4	11,6	0,05

Par la même méthode, les quantités de chaleurs obtenues par le liquide 1 pour des masses de 2 et 3 kg sont respectivement 69,514 et 107,780 kg.

▪ Chaleur perdue dans les fumées:

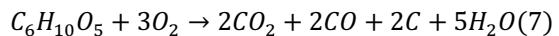
Le volume et la composition des fumées ainsi que de l'air sont les paramètres à prendre en compte dans le calcul de la chaleur perdue par les fumées :

$$Q_{pf} = \sum (C_p(t) * V_F - C_{p,air}(t) * V_{air}) (T_F(t) - T_{amb}) \quad (6)$$

(Hamidou et al.,2013)

$$C_p(t) = 842 \frac{J}{K} \cdot \text{Kg}, C_{p,air} = 1005 \text{ J/k.kg}$$

Où $C_p(t)$ est la chaleur spécifique du gaz rejeté ($\text{CO}, \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{SO}_2, \text{NO}...$) à l'instant t ; $T_F(t)$ est la température des fumées à l'instant t ; V_F le débit volumique des fumées ; $C_{p,air}$ la chaleur spécifique de l'air ; V_{air} est le volume molaire de l'air et T_{amb} la température ambiante. Dans la composition élémentaire des masses expérimentales des déchets utilisés, la proportion des feuillets prédomine celle des autres constituant. La cellulose étant un constituant principal des feuillets, l'équation de combustion incomplète de celle-ci associée à l'équation des gaz parfaits a été utilisée pour la détermination du débit volumique des fumées (V_F) et de celui de l'air (V_{air}). L'équation (7) représente celle de la combustion incomplète de la cellulose.



L'équation (7) décrit la combustion incomplète de la cellulose. La cellulose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) et le dioxygène (O_2) représentent les réactifs, le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), le carbone (C) et la vapeur d'eau (H_2O) sont les produits de cette réaction.

L'air et les fumées issues de la combustion, étant considérés comme gaz parfaits, l'équation (8) des gaz parfaits associé à un Tableur Excel a été utilisée pour déterminer leurs volumes.

$$PV = nRT \quad (8)$$

P, la pression atmosphérique normale = 1 atm, V le volume, n représente la quantité de matière, T la température et R la constante universelle des gaz parfaits.

$$Q_{pf} = 51770 \text{ J} = 51,770 \text{ kJ} = 0,051 \text{ MJ}$$

- *Chaleur perdue par les imbrûlés combustibles:*

La quantité de chaleur perdue dans les imbrûlés combustibles est tributaire des chaleurs de combustion et des fractions volumiques des différents gaz qui sont généralement ramenées à celle du monoxyde de carbone (CO) donc à celle de la combustion incomplète.

La détermination de cette chaleur est obtenue en utilisant l'expression suivante :

$$Q_{pi} = \sum \frac{(12644 * V_{CO} + 10862 * V_{H_2} + 35797 * V_{CH_4}) * V_F * T_0}{T_F} \quad (9)$$

(Hamidou et al.,2013)

Où les constantes 12644 ; 10862 et 35797 sont respectivement la chaleur de combustion de CO, H_2 et CH_4 exprimées en kJ/Nm^3 ; V_{CO} V_{H_2} et V_{CH_4} représentent les fractions volumiques des différents gaz ; $T_0 = 273,16 \text{ K}$; V_F : débit volumique des fumées V_{CH_4} provenant de la proportion plastique est négligé dans notre étude car cette proportion a été déduite des masses expérimentales pour éviter son impact sur l'environnement.

$$Q_{pi} = 10735477,49 \text{ J} = 10735,47 \text{ kJ} = 10,73 \text{ MJ}$$

- *Chaleur perdue dans les solides (cendres) imbrûlés*

L'expression de cette chaleur qui est fonction des cendres est donnée par :

$$Q_{ps} = m_c * C_p * \Delta T_c \quad (10) \quad (\text{Hamidou et al.,2013})$$

Où C_p : chaleur spécifique des cendres ($C_p = 0,8 \text{ kJ/kg K}$) ; m_c est la masse des cendres et T_c la température des cendres en fin de combustion.

ΔT_c est le gradient de température en fin de combustion. Pour les différentes masses utilisées dans cette étude, les valeurs de ΔT_c sont représentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Valeurs des gradients de température en fonction des masses expérimentales

Masse Expérimentale en Kg	Températures initiales des cendres (Degré Kelvin)	Températures finales des cendres (Degré Kelvin)	ΔT_c
1	305	353,2	48,2
2	305	358,3	53,3
3	305	363,3	58,3

Pendant la période expérimentale (Mars-Avril), la température ambiante oscille autour de 32°C.

Pour chaque expérience, les solides imbrûlés sont récupérés et pesés. Leur masse est ainsi déterminée. Le tableau 3 représente les différentes valeurs de la masse des imbrûlés solides.

Tableau 3. Valeurs et Pourcentage de la masse des imbrûlés solides des différentes masses expérimentales

Masse Expérimentale en Kg	Masse des imbrûlés solides (m_c) en kg	Pourcentage de m_c par rapport à la masse expérimentale en %
1	0,022	2,21
2	0,048	2,40
3	0,073	2,45

Les valeurs de la chaleur perdue dans les imbrûlés solides pour les différentes expériences réalisées sont représentées dans le Tableau 4.

Table 4. Valeurs de la Chaleur perdue dans les imbrûlés solides des différentes masses expérimentales

Masse Expérimentale en Kg	Chaleur perdue dans les imbrûlés (cendres) solides (Q_{ps}) en MJ/kg
1	0,008
2	0,022
3	0,046

- *Chaleur perdue dans les parois:*

Ces pertes sont essentiellement dues au rayonnement des parois de la chambre de combustion. Elles sont déterminées à travers l'expression suivante :

$$Q_{pp} = \sum (\varepsilon_p * \sigma * F_p * (T_p^4 - T_a^4) * \Delta t) \quad (11)$$

(Hamidou et al.,2013)

Où $\varepsilon_{porte} \sigma F_{porte} = 1,3951 \cdot 10^{-8}$; T_p est la température de la paroi (ou porte) ; T_a , température ambiante et Δt le temps d'acquisition des données.

$$Q_{pp} = 676160,677 \text{ J} = 676,160 \text{ kJ} = 0,676 \text{ MJ}$$

- *Chaleur perdue dans les résidus solides:*

Cette quantité de chaleur est déterminée par estimation à partir de l'expression suivante :

$$Q_{pr} = Q_{sol} + Q_{vol} \quad (12)$$

(Hamidou et al.,2013)

Où $Q_{vol} = 10\%Q_{pi}$ (estimation) et $Q_{sol} = 4,1868 * PCI_{coke} * 15\%m_{comb} * Ay$ avec $PCI_{coke} = 7800 \text{ cal/kg}$; m_{comb} la masse de combustible et Ay la proportion d'imbrûlés

Ay est le rapport entre la masse des résidus et la masse initiale du combustible ; c'est un pourcentage.

La masse des résidus solides est de 0,82 kg, ce qui représente 27 % de la masse totale des déchets mis en jeu dans l'expérience.

$$Q_{pr} = 1074870,359 \text{ J} = 1074 \text{ kJ} = 1,074 \text{ MJ}$$

Par la même méthode et avec le tableur Excel, la chaleur perdue dans les résidus solides pour les autres masses expérimentales sera déterminée.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A la fin de l'expérience, les valeurs des mesures ont été intégrées dans un tableur Excel pour le calcul des différentes quantités de chaleur qui rentrent dans la détermination du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) des déchets ménagers.

Ainsi les différentes quantités de chaleur qui rentrent dans le calcul du pouvoir calorifique sont données dans le tableau 5.

Le Pouvoir Calorifique étant déterminé par la prise en compte de l'ensemble de ces chaleurs.

Ainsi, pour une masse expérimentale de déchets de 1 kg on a :

$$PCI_1 = \frac{Q_{Comb}}{m_{Comb}} = \frac{34,052}{1} = 34,052 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (13)$$

PCI_2 est le Pouvoir Calorifique Inférieur pour une masse expérimentale de 2 kg et PCI_3 , le Pouvoir Calorifique Inférieur pour une masse expérimentale de 3 kg. Leurs valeurs sont déterminées par les équations (14) et (15)

$$PCI_2 = \frac{Q_{Comb}}{m_{Comb}} = \frac{77,464}{2} = 38,732 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (14)$$

Tableau 5. Résultat des différentes quantités de chaleur calculées

Quantité de chaleur (MJ)	Q _{re}	Q _{pf}	Q _{pi}	Q _{ps}	Q _{pp}	Q _{pr}	Q _{Comb}
Pour une masse de 1kg	31,053	0,051	1,190	0,008	0,676	1,074	34,052
Pour une masse de 2kg	69,514	0,078	5,700	0,022	0,850	1,300	77,464
Pour une masse de 3kg	107,780	1,200	8,500	0,046	0,856	1,350	119,732

Les expériences ont été menées durant les périodes de fortes chaleurs (mois d'avril, mai et juin). De ce fait on constate une variation considérable de la température ambiante.

Une forte croissance de la température du liquide1 (l'eau à chauffer dans le réservoir) est observée (Fig. 2). La température ambiante n'a d'effet sur la croissance de la température du Liquide1.

Au niveau de la Fig.3, la température de la paroi subit une forte variation après le début de la combustion. De ce fait, il est nécessaire de considérer la quantité de chaleur perdue par les parois de la chambre de combustion.

Durant la combustion, la température des fumées varie entre 46,8°C et 39,2°C (Fig. 4). Cette variation de température nécessite une prise en compte de la chaleur perdue dans les fumées.

$$PCI_3 = \frac{Q_{Comb}}{m_{Comb}} = \frac{119,732}{3} = 39,910 \text{ MJ/kg} \quad (15)$$

Le Pouvoir Calorifique moyen obtenu en considérant l'expérience réalisée avec les différentes masses de déchet est :

$$\begin{aligned} PCI_{MOY} &= \frac{PCI_1 + PCI_2 + PCI_3}{3} \\ &= \frac{34,052 + 38,732 + 39,910}{3} \\ &= 37,564 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

La proportion des déchets plastiques a été soustraite pour des raisons d'impacts environnementales. La nature plastique des déchets influence considérablement sur la valeur du Pouvoir Calorifique Inférieur. L'aspect environnemental n'a pas été pris en compte dans les études précédentes (Hamidou et al., 2013) dont la valeur du PCI ($20,22 \pm 4,45 \text{ MJ/kg}$) reste inférieure à celle trouvée dans la présente étude. La prise en compte de toutes les quantités de chaleur perdues a fortement contribué à l'amélioration le PCI moyen obtenu.

La conception de la chambre de combustion du dispositif avec des matériaux à forte isolation thermique (Silicate de calcium, fibre de céramique...) contribuerait à améliorer cette valeur du PCI.

La variation de la température du liquide1 par rapport à la température ambiante est donnée par la figure 2 (Fig.2).

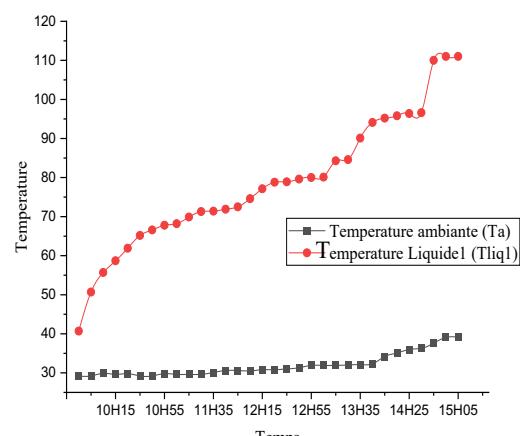


Fig 2 : Variation de la température du Liquide 1 et de la température ambiante

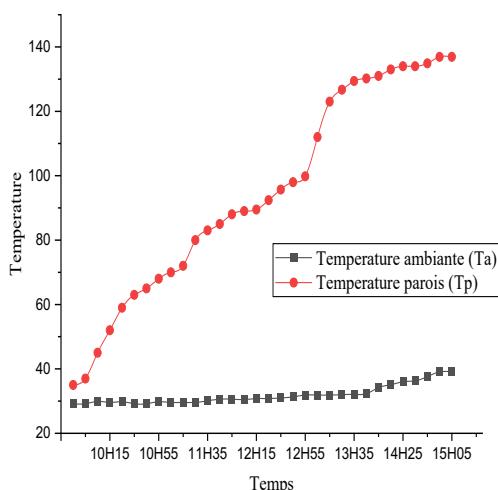


Fig 3 : Variation de la température parois et de la température ambiante

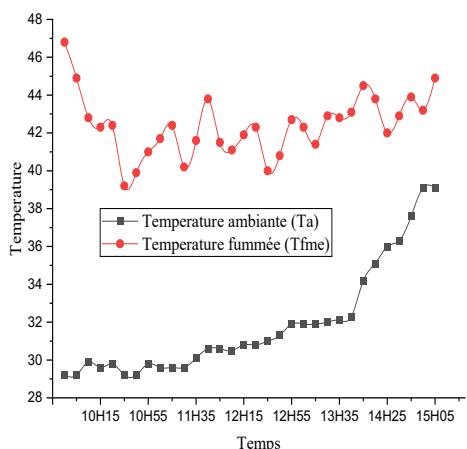


Fig 4 : Variation de la température fumée et de la température ambiante

Le Pouvoir Calorifique moyen obtenu en considérant l'expérience réalisée avec les différentes masses de déchet est 37,564 MJ/kg.

Le PCI des ordures de la ville de Nouakchott est 11,085

MJ/kg dans l'étude menée par Aloueimine en 2006. Celui de la ville de Ouagadougou vaut $20,22 \pm 4,45$ MJ/kg dans l'étude menée par Hamidou et al., en 2013.

On constate une valeur élevée du PCI calculé dans cette étude par rapport aux études citées ci-dessus. Cela est dû à la prise en compte de certaines quantités de chaleur. Aussi, cette étude préserve l'environnement en négligeant les proportions plastiques dans la combustion des déchets ménagers utilisés.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce présent travail porte sur l'étude expérimentale du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) des déchets ménagers de la ville de Bamako. Au cours de cette étude, nous avons procédé à des tris manuels de ces déchets afin de séparer les échantillons plastiques de la masse combustible. Le

résultat de cette pratique a montré que les déchets ménagers traités sont constitués de papiers ou cartons d'emballage, de débris de bois, de feuillets secs ; de déchets de cuisine et de plastiques, pour des masses initiales de 1,378 kg, 2,252 kg et 3,378 kg. Le dispositif expérimental est un mini incinérateur, conçu avec des matériaux de récupération pour déterminer le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) des déchets ménagers par combustion. Pour différentes masses de combustible (sans les proportions plastiques), le PCI moyen obtenu est 37,564 MJ/kg. Cette valeur est satisfaisante comparativement à celles de d'autres d'études. Elle peut être améliorée en utilisant de matériaux de très bonne isolation thermique. Cette pratique permet de valoriser les déchets ménagers et la création d'emploi d'une part et d'autre part de préserver l'environnement.

En perspective, la vulgarisation à grande échelle de cette méthode de gestion des déchets servira à résoudre le déficit énergétique au Mali et dans les Pays à fort besoin énergétique.

REFERENCES

- Aloueimine, S., 2006, Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision ", thèse, Limoges. <http://www.theses.fr/2006LIMO0004>
- Ammar, B. S., 2006, Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des traitements adaptés dans les pays en développement : résultats de la caractérisation dans le grand Tunis : mise au point d'une méthode adaptée", Thèse de doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, NPL. <https://www.theses.fr/2006INPL065N>
- Baguian, A., OUIMINGA, S., Harouna Gado, I. Sayon Dit Sadio, S. et Bere, A., nov. 2021, Caractérisation expérimentale de briquettes à base de déchets papiers/cartons et Etude de l'impact du liant lors de leur conception ", Journal de Physique de la SOAPHYS, vol. 3, p. C21A04-1, doi : 10.46411/jpsoaphys.2021.01.04.
- Bah, O. Sanogo, B. et Traore, M., nov. 2021, Caractérisation des déchets solides ménagers de Faladié", Esj, vol. 17, no 39, doi : 10.19044/esj. 2021.v17n39p77.
- Bisimwa Kayeye D., Masilya Mulungula, P. et Gisele, J. C., Novembre 2013, Essai de compostage comme voie de valorisation des déchets ménagers solides dans la ville de Bukavu au Sud-Kivu (RD Congo)", Environnement, Ingénierie & Développement, vol. N°65, p. 7832, nov. 2013, doi : 10.4267/dechets-sciences-techniques.1023.
- Bosko, D. T. H., & Emile, P. T. 2020. Rapport sur la gestion des déchets à Bamako", Pseau.
- Boukria, A. et Ouahrani, G., 2018, Valorisation des déchets ménagers et des grignons d'olive par dégradation anaérobiose et production de compost et de biogaz", Thèse, Université Frères Mentouri - Constantine1.<http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/4944>
- Bouferrache, A.-L., 2019, Valorisation des déchets organiques (fraction fermentescible des déchets ménagers et assimilés et le grignon d'olives) dans la commune de Ait Yahia Moussa", Thèse, Université Mouloud Mammeri. : <https://www.ummtm.dz/dspace/handle/ummtm/14024>

- Boukria, A. et Ouahrani, G., 2018, Valorisation des déchets ménagers et des grignons d'olive par dégradation anaérobiose et production de compost et de biogaz", Thèse, Université Frères Mentouri - Constantine1. <http://depot.utm.edu.dz/handle/123456789/4944>
- Chekiche, N., 2022, Valorisation des déchets générés par l'usine Biskria et leurs utilisations dans le secteur ", Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Citeretse, L., 2008, Les déchets ménagers solides de la ville de Bujumbura (Burundi) : Quelles perspectives pour une gestion durable [Mémoire de maîtrise, Université Libre de Bruxelles]. https://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires_en_pdf/MFE_07_08/MFE_Citerets_e_07_08.pdf.
- Daskalakis, K. D., & Badr, O., 2004. Municipal solid waste : A prediction methodology for the generation rate and composition in the European Union countries and the United States of America",
- Deleuze, C., Morneau, F., Constant, T., Saint André, L., Bouvet, A., Colin, A., Vallet, P., Gauthier, A., & Jaeger, M., 2013. Le projet EMERGE pour des tarifs cohérents de volumes et biomasses des essences forestières françaises métropolitaines", Rendez-vous Techniques de l'ONF, 39-40, 32-36. <https://hal.science/hal-00934771>
- Doumbia, B. Attino, M., Diarra, B., Dembele, G. et Coulibaly, Y., 2022, Le tri sélectif à la base : conditions de réussite et attitudes des ménages dans le district de Bamako (Mali)", Institut de Pédagogie Universitaire (IPU), Bamako, Mali, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB) Faculté d'Histoire et Géographie, Bamako, Mali
- Elisa, M., Fanny R., and Aurélien, R., 2014, Le tri des déchets ménagers : une caractérisation des logistiques déployées par les consommateurs", <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0767370114527674>.
- Fatiha, A. Y. et Katia, D., 2021, Contribution au recyclage des déchets de démolition", Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.
- Gérard, A. et Mourad, H., 2001, pyrolyse_1_.pdf ", Ademe/Procedis
- Guermoud, N. et Addou, A., mars 2014, Etude et caractérisation des déchets ménagers de la ville de Mostaganem (Ouest-Algérie)", Environnement, Ingénierie & Développement, vol. N°66, doi : 10.4267/dechets-sciences-techniques.2554
- Hamidou, S., Nzihou, J F., Bouda, M., Rogaume, T. Kouliadiati, J., et Segda, B. G., 2013, Contribution à l'évaluation du pouvoir calorifique inférieur du déchets modèle des pays en développement : cas de la fraction combustible des ordures ménagères (om) du Burkina Faso ", Sciences des Structures et de la matière, vol. 1, no 1, Art. no 1, <http://publication.lecames.org/index.php/mat/article/view/169>
- Haouaoui, L. et Loukil, F., 2009, Evaluation du système de gestion des déchets ménagers en Tunisie", UaquaP, Institut Supérieur de Gestion, Tunis.
- INSTAT, 2023, Institut National de la Statistique du Mali Instat", Institut National de la Statistique du Mali Instat. <https://instat-mali.org/fr>
- Iwunze, P., 2021, Benchmarking et sélection des technologies de pyrolyse et de gazéification adaptées à la valorisation des CSR et du Bois-B sous forme du gaz", report, Imt mines-albi. <https://hal.science/hal-03192601>
- Keller, T., 2009, La valorisation énergétique des déchets par incinération", HEC, France, <https://www.vernimen.be/ftp/La valorisation énergétique des déchets par incinération.pdf>
- Kple, M., 2015, Étude des voies de valorisation des déchets ménagers au Bénin : cas de la ville d'Abomey-Calavi", PhD thèse, Université de Lorraine.
- Laabidi, S., 2022, Techniques De Recyclage Des Plastiques Au Niveau Industriel », Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- Lebon, É., 2019, Optimisation de la méthanisation sèche des déchets ménagers", PhD thèse, Université de la Réunion. <https://theses.hal.science/tel-03070792>
- Liboiron, M., & Vermeersch, L., 2017. Recycler : Une crise du sens. Vacarme", 79(2), 99-103. <https://doi.org/10.3917/vaca.079.0099>
- Lumani, K., et Théophile, N., 2016, Modèle thermogravimétrique d'évaluation des rendements de pyrolyse et de gazéification de la fraction fermentescible des déchets ménagers à Bujumbura", Afrique Science Revue Internationale des Sciences et Technologie, Université du Burundi.
- Lund, H., 2009. Renewable energy systems : The choice and modeling of 100% renewable solutions", Elsevier.
- Manuel, G. et Pierre, M., 1997, La notion de valorisation des déchets", p. 14, Université de Lille II
- Meciel, L. et Messouri, Z., sept. 2020 Valorisation des déchets domestiques(compostage)", <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/handle/123456789/9149>
- Mhemed, H. A., 2021, Valorisation énergétique et environnementale des déchets de pneus usagés : amélioration des produits liquides de pyrolyse par catalyse", Génie des procédés. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique ; École nationale d'ingénieurs de Gabès (Tunisie).
- Mohamadou, M., et Oumar, C., 2021, Caractéristiques des ordures ménagères de Bamako au Mali : tri granulométrique et par catégories", p. 12. Institut des Sciences Appliquées/Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako – Mali Institut Africain de Gestion Urbaine de Dakar -Sénégal.
- Mohamadou, M., et Oumar, C., 2021, Étude expérimentale de la caractérisation des ordures ménagères de Bamako au Mali", Institut des Sciences Appliquées/Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako – Mali Institut Africain de Gestion Urbaine de Dakar -Sénégal.
- Ngnikam, E., Naquin, P., Oumbe, R. et Djietcheu, K. B., sept. 2017, Evolution of household solid waste characteristics in Yaoundé city, Cameroon (1995-2015)", Environnement, Ingénierie & Développement, vol. N°74, p. 7778, doi : 10.4267/dechets-sciences-techniques.3654.
- Ntalani, H., Ndinga, A. M. E., Ntsatouabaka I. G., et Mpolo, B., 2020, Essais de valorisation des déchets solides ménagers biodégradables par compostage en milieu urbain au Congo", Université Marien Ngouabi, Faculté des Sciences et Techniques, Unité de Chimie du Végétal et de la Vie, BP69, Brazzaville, République du Congo.
- Obame, P. C. N. 2021., Recommandations pour optimiser la gestion des déchets ménagers sur le territoire de la capitale du Gabon, Libreville", Université De Sherbrooke.

- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K., 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels", Fuel, 84(5), 487-494.
- Resse, A., 1998, Caractérisation des déchets ménagers : secteur touristique de Fouras, secteur de Rochefort équipé d'un compostage individuel", irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02578884>
- Rojo, G., 2009, La gestion dynamique des déchets (GDD): élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets", p. 218.
- Saïdi-Boulahia, A. et Abada, S., 2018, Valorisation des déchets organiques ménagers et", Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, ALGERIE.
- Shi, L., Zhang, X., Jiang, X., & Wu, J., 2016. Proximate and ultimate analysis of CFB-co-combustion of MSW and coal", Energy Procedia.
- Soumaya, B., 2018, Amélioration de la qualité des huiles issues de la pyrolyse-microondes des déchets ménagers - ProQuest", École polytechnique de Montréal.
- Zineb, B. S. S., Arezki, D., Khellaf, R. et Melissa, A., 2020, Compostage, alternative pour valoriser les déchets de restauration des collectivités, cas du restaurant universitaire de Tizi-Ouzou (Algérie)",