INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU

ET DE L'ENVIRONNEMENT

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT 2iE

Spécialité : **ENERGIE**

Présentée et soutenue publiquement

Par Tano Ladji ACKA

Le 03 avril 2025

Réf : 2iE/2025-08

Etude de la conversion thermochimique et de la valorisation des résidus de transformation des amandes de karité en biocombustibles briquettes

JURY

M. Benjamin Kouassi YAO, Professeur Titulaire, INPHB, Côte d'Ivoire	Président
M. Alpha Ousmane TOURE, Maître de Conférences (CAMES), Université Cheikh Anta Diop, Sénégal	Rapporteur
M. Boureima DIANDA, Maître de recherche (CAMES), IRSAT/CNRST, Burkina Faso	Rapporteur
M. Moussa BOUGOUMA, Professeur Titulaire, Université Norbert ZONGO, Burkina Faso	Examinateur
M. Lamine ZERBO, Professeur Titulaire, Université Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso	Examinateur
M. Abdelaziz BACAOUI, Professeur des Universités, Université Cadi Ayyad, Maroc	Co-Directeur de thèse
M. Wennd Kouni Igor OUEDRAOGO, Professeur Titulaire, Institut 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse

Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE/2iE)

Dédicaces

Je dédie ce manuscrit de thèse à :

- ***Mon père ACKA Tano Abou et ma mère YIPOU Fatou***

- ***Mon oncle, mon conseiller ACKA Tano Mahaman et son épouse KOFFI Adjoua Malaman***

- ***Ma tante et mère adoptive AKA Tano Mokoi Awa***

- ***Mon fils ACKA Abdoulaye Rayane et sa maman MEMTI Carine***

- ***Mes frères et sœurs***

- ***Mes cousins et cousines***

- ***Toute la famille ACKA Tano***

Remerciements

Les présents travaux de thèse ont été réalisés au Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) dans le cadre des projets de Centres d'Excellence Africains pour l'Impact de la Banque Mondiale (CEA-Impact). Je ne saurais en présenter les résultats sans adresser mes sincères remerciements aux instances dirigeantes de ces deux institutions pour les avoir financés. L'Institut 2iE m'a non seulement offert un cadre de travail approprié dans un environnement multiculturel très intéressant, mais a également facilité mes collaborations avec d'autres laboratoires de recherche. J'adresse de ce fait, une mention spéciale à ses dirigeants.

J'exprime ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse, Monsieur Wennd Kouni Igor OUEDRAOGO, Professeur Titulaire à l'Institut 2iE et Responsable de l'Ecole Doctorales Sciences et Technologies de l'Eau, de l'Energie et de l'Environnement, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur ce sujet de thèse, pour la bonne qualité de son encadrement scientifique et pour le sens de l'humanisme dont il a fait preuve à mon égard. Le cadre permanent de discussion que vous avez créé ainsi que vos orientations et vos conseils m'ont permis de surmonter les différentes difficultés qui se sont présentées à moi et ont permis de mener ce travail à terme. Vous m'avez sans cesse encouragé à travailler davantage et vous avez soutenu mes prises d'initiatives dans la limite de leurs pertinences scientifiques. Cette rigueur scientifique que vous mettiez dans nos échanges et les commentaires constructifs que vous avez apportés sur chaque aspect de mes travaux font de moi aujourd'hui, un bien meilleur scientifique. Je vous en remercie du plus profond de mon cœur.

Je remercie également mon co-Directeur de thèse, Monsieur Abdelaziz BACAOUI, Professeur à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech pour avoir accepté que je travaille sur ce sujet de recherche et pour avoir contribué à son aboutissement. Vos précieux conseils et orientations sur la méthodologie des plans d'expérience m'ont permis de mieux la maitriser et de l'utiliser efficacement à l'atteinte des objectifs que nous nous sommes fixés ; je vous en suis reconnaissant.

J'adresse mes sincères remerciements à Dr. Marie TIEMTORE/SAWADOGO (Maître de Conférences CAMES), Responsable du LabEREE et membre de l'équipe d'encadrement. Vous avez été présente à chaque fois que je vous ai sollicité puis vous m'avez encouragé et soutenu dans les moments difficiles. Votre regard critique sur mon travail ainsi que la pertinence de vos orientations et vos conseils m'ont grandement aidé pour mener cette thèse à terme. Les

échanges que nous avons eu depuis le début de ma thèse jusqu'au moment où j'écris ces mots ont été riches en enseignements et m'ont toujours guidé dans mes choix. De plus, vous avez créé les conditions propices à la réalisation de mes travaux de recherche au sein du LabEREE en mettant à ma disposition tout le matériel nécessaire et les réactifs requis par mes analyses ; je vous en suis profondément reconnaissant.

A tous les enseignants-chercheurs, aux ingénieurs de recherche et techniciens et à l'assistante du LabEREE, je vous dis « merci » pour m'avoir chaleureusement accueilli et pour avoir contribué d'une façon ou d'une autre à la réussite de cette thèse. J'ai une pensée pour Innocent TANKOANO, Sidi TAHIROU et Théodore BELEMGNEGRE qui m'ont initié à l'utilisation de l'analyseur thermogravimétrique (ATG), je me souviens des nombreuses fois où vous m'avez aidé à régler ou dépanner cet appareil si sensible.

Je tiens à remercier le Professeur Adama MESSAN, Responsable du Laboratoire Eco-matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) de l'Institut 2iE pour avoir facilité l'utilisation et l'adaptation de la presse hydraulique à la production de mes biocombustibles briquettes.

J'ai une grande reconnaissance envers Dr. Sévérin Tchini TANOH, enseignant-chercheur à l'Université de San-Pedro (Côte d'Ivoire) qui bien que nous ne nous connaissions pas, n'a pas hésité un seul instant quand je l'ai contacté la première fois afin qu'il m'aide à comprendre certains aspects de l'ATG. Depuis lors, il a répondu présent à chaque fois que je l'ai sollicité pour des conseils et des commentaires sur certains aspects de mes travaux de thèse.

Mon séjour à l'Université de Lisbonne au Portugal a été une belle expérience ; il m'a donné l'occasion de collaborer avec d'autres chercheurs et m'a permis de réaliser certaines analyses complémentaires. Je remercie à cet effet Dr. Vesna BOZANIC pour m'avoir aidé dans les démarches administratives au sein de l'Institut Supérieur Technique (IST). Je tiens à adresser ma reconnaissance au Professeur Miguel MENDES, Coordonnateur du groupe de recherche ''Combustion et Développement Durable'' du centre d'Energie et Mécanique des Fluides de l'IST pour m'avoir chaleureusement accueilli et pour avoir facilité toutes les analyses que j'ai effectuées au sein du Département d'Ingénierie Mécanique (IDMEC). Je remercie également le technicien, Monsieur Manuel PRATAS pour m'avoir aidé à installer le dispositif de combustion que nous avons conçu pour analyser les gaz de combustion des briquettes et André avec qui j'ai longuement travaillé au laboratoire lors de ce séjour.

Je remercie l'ensemble de mes collègues doctorants du LabEREE et ceux qui ont soutenu avant moi pour leur soutien et les moments inoubliables que nous avons passés ensemble. Bien que

nous soyons pour la plupart de nationalités différentes, grâce à votre sens élevé de la fraternité, nous avons su créer une vraie famille au-delà de nos différences. Grâce à vous, j'ai appris énormément de choses sur la culture de différents pays africains partant de Madagascar en passant par le Mozambique, le Kenya, le Cameroun, le Congo, le Bénin, le Sénégal, le Mali, le Togo, etc. Vous m'avez vraiment enrichi et je ne vous oublierai jamais.

A mes collègues des deux autres laboratoires de l'Institut 2iE à savoir le LEMHaD et le LEHSA, je vous remercie également pour vos soutiens.

Je n'oublie évidemment pas les membres de ma famille pour leurs prières et leur soutien sans faille même dans les moments difficiles, je vous suis énormément reconnaissant.

Enfin, je remercie tous mes amis qui m'ont soutenu d'une façon ou d'une autre.

Rendez-vous au Sommet !

Résumé

Ce présent travail a pour objectif d'étudier la conversion thermochimique des résidus issus de la transformation des amandes de karité et leur valorisation en biocombustibles briquettes. Les analyses physico-chimiques et thermogravimétriques sous atmosphères inerte et oxydante des résidus boues de barattage (BBa), tourteaux de presse (TPo) et tourteaux de presse déshuilés (TPo.d) ont été réalisées. Les résultats ont montré que les résidus BBa (27,70 $MJ.kg^{-1}$) présentent un pouvoir calorifique supérieur (PCS) plus élevé comparativement aux résidus TPo (23,12 $MJ.kg^{-1}$) et TPo.d (20,93 $MJ.kg^{-1}$) et ces valeurs de PCS sont dépendantes de la teneur en matière grasse résiduelle. Les paramètres cinétiques et thermodynamiques ont été calculés à l'aide de l'approche isoconversionnelle. Les résultats ont montré que le modèle de Friedman est plus précis que les modèles KAS et de Vyazovkin pour la détermination des paramètres cinétiques (E_α et A_α) du processus de combustion de ces biomasses. Les résidus BBa ($E_{\alpha moy}$~107,48 $kJ.mol^{-1}$) ont présenté une plus grande réactivité à l'allumage tandis que les réactivités de TPo ($E_{\alpha moy}$~112,55 $kJ.mol^{-1}$) et TPo.d ($E_{\alpha moy}$~116,55 $kJ.mol^{-1}$) ont significativement augmenté à haute température sous l'effet catalytique des éléments minéraux. La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été utilisée pour déterminer les conditions optimales de densification de BBa et TPo en biocombustibles briquettes. Les effets de la pression de compactage, du taux d'humidité, du ratio liant/biomasse et du temps de séjour ont été analysés. Les conditions optimales de densification conduisant à des biocombustibles briquettes qui allient à la fois de bonnes propriétés mécaniques et thermiques ont été obtenues avec 10 % de liant (mélasse), 18,5 kPa de pression de compactage, 20 % de taux d'humidité et 180 s de temps de séjour pour le résidu TPo puis 15 kPa, 12 % de taux d'humidité, 300 s et sans apport de liant pour le résidu BBa. De plus, ces travaux ont révélé que la présence de la matière grasse dans les résidus a permis d'améliorer la texture et la résistance des biocombustibles briquettes, et elle a facilité leur retrait du moule, ce qui pourrait être un facteur déterminant pour améliorer le processus de fabrication à grande échelle. Enfin, l'étude portant sur les quantités de polluants NOx détectées dans les gaz de combustion des briquettes de BBa et TPo a montré qu'elles étaient en dessous de la limite recommandée par les normes actuelles. La valorisation des résidus de transformation des amandes de karité du Burkina Faso sous formes de biocombustibles briquettes pourrait permettre de sauvegarder l'équivalent de 187 517 tonnes de bois chaque année.

Mots-clés : Biomasse, Boue de barattage, Tourteau de presse, Biocombustible briquette, Combustion, Cinétique, Densification, Décomposition thermique

Abstract

The aim of this work is to study the thermochemical conversion of residues from the processing of shea almonds and their valorization into biofuel briquettes. Physico-chemical and thermogravimetric analyses under inert and oxidative atmospheres of the residues viz shea churning mud (SCM), shea press cakes (SPC) and de-oiled shea press cakes (dSPC) were carried out. The results showed that the SCM residues (27.70 $MJ.kg^{-1}$) exhibited a higher HHV compared to that of SPC (23.12 $MJ.kg^{-1}$) and dSPC (20.93 $MJ.kg^{-1}$) residues, and these HHV values depending on the residual fat content. Kinetic and thermodynamic parameters were computed using the isoconversional approach. The results showed that Friedman's model is more accurate than the KAS and Vyazovkin models for determining the kinetic parameters (E_α and A_α) of the combustion process of these biomasses. The SCM residues ($E_{\alpha avg}$~107.48 $kJ.mol^{-1}$) showed a higher reactivity at ignition step while the reactivities of SPC ($E_{\alpha avg}$~112.55 $kJ.mol^{-1}$) and dSPC ($E_{\alpha avg}$~116.55 $kJ.mol^{-1}$) significantly increased at high temperatures under the catalytic effect of certain mineral elements. The response surface (MSR) methodology was used to determine the optimal conditions for the densification of SCM and SPC into biofuel briquettes. The effects of compaction pressure, moisture content, binder/biomass ratio and residence time were analyzed. The optimal densification conditions leading to biofuel briquettes that combine both good mechanical and thermal properties were obtained with 10 % binder (molasses), 18.5 kPa compaction pressure, 20 % moisture content and 180 s residence time for the SPC residue, and 15 kPa, 12 % moisture content, 300 s without addition of binder for the SCM residue. Moreover, this work revealed that the presence of fat in the residues improved the texture and strength of the biofuel briquettes, and facilitated their demolding, which could be a key factor in improving the large-scale manufacturing process. Finally, the study on the amounts of NOx pollutants detected in the flue gases of SCM and SPC biofuel briquettes showed that they were lower than the limit recommended by the current standards. The recovery of shea almond processing residues in Burkina Faso into biofuel briquettes could save the equivalent of 187,517 tons of wood each year.

Keywords: Biomass, Shea churning mud, Shea press cake, Biofuel briquette, Combustion, Kinetics, Densification, Thermal decomposition

Table des matières

Dédicaces i
Remerciements ii
Résumé v
Abstract vi
Liste des figures xiii
Liste des tableaux xvii
Liste des sigles et des abréviations xix
Introduction générale 2
Chapitre 1 : Revue bibliographique 6
1.1 Besoins énergétiques 7
1.2 Généralités sur les combustibles 8
1.3 Biomasse et voix de valorisation énergétique 9
1.3.1 Définition de la biomasse 9
1.3.2 Formation de la biomasse et cycle du carbone 9
1.3.3 Composition chimique de la biomasse 10
1.3.3.1 Composition élémentaire 10
1.3.3.2 Composition structurale 11
1.3.3.3 Les extractibles 14
1.3.3.4 Les matières minérales 14
1.3.4 Voies de valorisation énergétiques de la biomasse 14
1.3.4.1 Voies de conversion biochimique de la biomasse 15
1.3.4.2 Extraction mécanique ou au solvant des huiles végétales 16
1.3.4.3 Voies de conversion thermochimique de la biomasse 16
1.3.5 Classification de la biomasse 18
1.4 Le karité 20
1.4.1 Taxonomie 20
1.4.2 Distribution géographique 20
1.4.3 Le fruit du karité 21
1.4.4 Production du beurre de karité 22
1.4.4.1 Production du beurre de karité par pressage mécanique des amandes de karité 23
1.4.4.2 Production du beurre de karité par la méthode de barattage 23
1.5 Aspects généraux de la cinétique de décomposition thermique de la biomasse 25

1.5.1 Approche modélistique 27
1.5.2 Approche isoconversionnelle 28
1.6 Densification de la biomasse 30
1.6.1 Mécanisme de la densification 30
1.6.2 Quelques technologies de densification 31
1.6.2.1 Densification par pelletisation (granulation) 32
1.6.2.2 Densification par extrusion ou compactage avec une presse à vis 32
1.6.2.3 Densification par compression hydraulique 34
1.6.3 Liants de densification 35
1.6.4 Paramètres de densification 36
1.7 Généralités sur les plans d'expérience 37
1.7.1 Définitions et principe 37
1.7.2 Notion de facteur (Xi) 38
1.7.3 Notion de réponse (Y) 38
1.7.4 Domaine expérimental et plan d'expérimentation 38
1.7.5 Principaux avantages de la méthodologie des plans d'expériences 39
1.7.6 Optimisation par les plans de surfaces de réponse 39
1.7.6.1 Plan composite centré 40
1.7.6.2 Plan Box-Behnken 40
1.8 Analyse critique et formulation des questions de recherche 41
Chapitre 2 : Etude de la réactivité thermochimique des résidus de transformation des amandes de karité 45
2.1 Matériel et méthodes 46
2.1.1 Présentation des biomasses sélectionnées 46
2.1.1.1 Collecte des boues de barattage 47
2.1.1.2 Collecte des tourteaux de presse 48
2.1.2 Propriétés physico-chimiques 48
2.1.2.1 Analyse immédiate 48
2.1.2.2 Analyse ultime 50
2.1.2.3 Analyse des éléments inorganiques 51
2.1.2.4 Quantification de la matière grasse résiduelle 51
2.1.2.5 Quantification des macromolécules 52
2.1.2.6 Détermination du pouvoir calorifique 53
2.1.2.7 Densité apparente en vrac des biomasses 54

2.1.2.8 Analyse granulométrique 55
2.1.2.9 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier 55
2.1.3 Réactivité thermochimique 56
2.1.3.1 Principe de l'analyse thermogravimétrique 56
2.1.3.2 Description de l'analyseur thermogravimétrique utilisé 57
2.1.3.3 Protocole des analyses thermogravimétriques sous atmosphère inerte et oxydante 58
2.1.4 Etude de la cinétique de décomposition thermique 59
2.1.4.1 Méthode de Friedman 59
2.1.4.2 Méthode Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) 59
2.1.4.3 Méthode de Vyazovkin 59
2.1.5 Détermination des paramètres thermodynamiques 60
2.2 Résultats et discussions 61
2.2.1 Caractérisations physico-chimiques 61
2.2.1.1 Analyse immédiate, quantification de la matière grasse et pouvoir calorifique 61
2.2.1.2 Analyse ultime et quantification des macromolécules 62
2.2.1.3 Analyse des éléments minéraux 63
2.2.1.4 Densité apparente en vrac des biomasses 64
2.2.2 Analyse granulométrique 65
2.2.3 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourrier (FTIR) 66
2.2.4 Analyses thermogravimétriques 67
2.2.4.1 Analyses thermogravimétriques sous atmosphère inerte 67
2.2.4.2 Analyses thermogravimétriques sous atmosphère oxydante 69
2.2.5 Etude cinétique de la décomposition thermique sous atmosphère oxydante 73
2.2.5.1 Tracés des méthodes de Friedman et KAS 74
2.2.5.2 Energie d'activation par les méthodes de Friedman, KAS et Vyazovkin 76
2.2.5.3 Variation du facteur pré-exponentiel en fonction de l'avancement α 79
2.2.5.4 Comparaison de l'exactitude des modèles de Friedman, KAS et Vyazovkin appliqués à la combustion des biomasses 80
2.2.6 Paramètres thermodynamiques de la décomposition thermique des biomasses sous atmosphère oxydante 82
Chapitre 3 : Optimisation de la densification des boues de barattage et des tourteaux de presse 86
3.1 Matériel et méthodes 87

3.1.1 Production des biocombustibles briquettes 87
3.1.1.1 Matériel de briquetage 87
3.1.1.2 Protocole de production des biocombustibles briquettes 88
3.1.2 Méthode d'optimisation de la production des biocombustibles briquettes 88
3.1.2.1 Facteurs 88
3.1.2.2 Domaine expérimental 89
3.1.2.3 Plan d'expérimentation 89
3.1.3 Réponses 90
3.1.3.1 Densité apparente 90
3.1.3.2 Résistance à la compression 91
3.1.3.3 Vitesse de décomposition thermique 91
3.1.3.4 Densité énergétique 92
3.1.4 Analyse statistique 93
3.1.5 Caractérisation des briquettes optimisées de BBa et TPo 93
3.1.5.1 Analyses physicochimiques et pouvoir calorifique 93
3.1.6 Analyse thermique dans un foyer de cuisson amélioré 93
3.1.6.1 Temps d'ébullition 93
3.1.6.2 Consommation de combustible 94
3.1.6.3 Puissance de feu 94
3.1.6.4 Consommation spécifique de combustible 94
3.1.7 Microscopie électronique à balayage (MB) / analyse EDX 95
3.2 Résultats et discussions 96
3.2.1 Etude de la densification des boues de barattage (BBa) par la méthode de surface de réponse / plan Box-Behnken 96
3.2.1.1 Plan d'expériences Box-Behnken 96
3.2.1.2 Analyse statistique du modèle polynomial quadratique 99
3.2.1.3 Analyse statistique des coefficients et effets des facteurs de densification de BBa sur les réponses 100
3.2.2 Etude de la densification des tourteaux de presse (TPo) par la méthode de surface de réponse / plan Box-Behnken 108
3.2.2.1 Plan d'expériences Box-Behnken 108
3.2.2.2 Analyse statistique du modèle 2FI 111
3.2.2.3 Analyse statistique des coefficients et effets des facteurs de densification de TPo sur les réponses 112

3.2.3 Détermination des conditions optimales de densification de BBa et TPo 119
3.2.4 Caractérisation physicochimique des briquettes optimisées 124
3.2.5 Efficacité thermique des briquettes optimisées 125
3.2.5.1 Analyses à la microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse par énergie dispersive de rayons X (EDX) 126
Chapitre 4 : Etude de l'influence des propriétés physico-chimiques de la biomasse et du type de liant sur la densification et la composition des gaz de combustion 131
4.1 Matériel et méthodes 133
4.1.1 Collecte et préparation des liants de densification 133
4.1.2 Analyse des gaz de combustion 133
4.1.2.1 Cas des biomasses brutes 134
4.1.2.2 Cas des briquettes de BBa et de TPo 136
4.1.3 Impact environnemental 137
4.1.3.1 Potentiel théorique des résidus 137
4.1.3.2 Potentiel de résidu mobilisable 138
4.1.3.3 Potentiel énergétique des briquettes, quantité de bois équivalente et gain en CO_2 138
4.2 Résultats et discussions 139
4.2.1 Propriétés physico-chimiques des liants sélectionnés 139
4.2.2 Influence des propriétés physico-chimiques et du type de liant sur la densification des tourteaux de presse (TPo) 140
4.2.2.1 Densification de TPo avec liant 140
4.2.2.2 Influence du type de liant sur les propriétés des biocombustibles briquettes 144
4.2.2.3 Densification de TPo sans liant 146
4.2.3 Analyse des gaz émis par la combustion des biomasses brutes BBa et TPo 148
4.2.4 Analyse des gaz émis par la combustion des biocombustibles briquettes de BBa et TPo 150
4.2.5 Influence de l'excès d'air sur les émissions de CO et NOx lors de la combustion des briquettes de BBa 153
4.2.5.1 Cas des émissions de CO 153
4.2.5.2 Cas des émissions de NOx 155
4.2.6 Normalisation et conversion de la concentration des NOx émis 155
4.2.7 Influence du type de liant sur la concentration de NOx émis 157
4.2.8 Quantité de bois sauvegardée et gain en CO_2 158
4.2.9 Analyse financière 159

4.2.9.1 Cas 1 : production de biocombustibles briquettes à partir de BBa 160
4.2.9.2 Cas 2 : production de briquettes à partir de TPo 164
Conclusion générale et perspectives..... 169
Références bibliographiques 173
Annexes 188

Liste des figures

Figure 1.1. Évolution de l'approvisionnement énergétique mondial de 1990 à 2022 [1] 7
Figure 1.2. Formation de la biomasse d'origine végétale par la photosynthèse [12] 9
Figure 1.3. Diagramme de Van Krevelen des combustibles fossiles solides et de la biomasse [14] 11
Figure 1.4. Motif de répétition de la cellulose : 4-o-β-D-glucopyranosyl-D-glucopyranose [21] 12
Figure 1.5. Principaux monomères des hémicelluloses [25] 13
Figure 1.6. Monomères de la lignine [30] 14
Figure 1.7. Principales voies de valorisation énergétique de la biomasse [12] 15
Figure 1.8. Fruits du karité 22
Figure 1.9. Mécanisme de densification de la biomasse [70] 31
Figure 1.10. Presses à granulés (a) à filière annulaire et (b) à filière plate [72] 32
Figure 1.11. Schéma synoptique d'une presse à vis 33
Figure 1.12. Presse à vis locale 34
Figure 1.13. Principe de fonctionnement d'une presse hydraulique [74] 34
Figure 1.14. Schéma cybernétique de la boîte noire 37
Figure 1.15. Plan Box-Behnken pour trois facteurs 41
Figure 2.1. Description des techniques de (a) barattage et de (b) pressage mécanique des amandes de karité [5] 46
Figure 2.2. Localités de prélèvement des échantillons de biomasse 47
Figure 2.3. Boues de barattage (a) BBa, (b) BBu et (c) BBs 47
Figure 2.4. Tourteaux de presse (a) TPo, (b) (TPs) et (c) tourteaux de presse déshuilés (TPo.d) 48
Figure 2.5: (a) Dispositif d'extraction de la matière grasse résiduelle au soxhlet et (b) Evaporateur rotatif 52
Figure 2.6. Spectromètre IRTF ALPHA II, Bruker 56
Figure 2.7. Schéma synoptique d'un analyseur thermogravimétrique [8] 57
Figure 2.8. Analyseur thermogravimétrique, type Setsys Evolution/SETARAM 58
Figure 2.9. Densités apparentes des biomasses étudiées 65
Figure 2.10. Distribution granulométrique de BBa, TPo et TPo.d 66
Figure 2.11. Analyse FTIR de BBa, TPo et TPo.d 67
Figure 2.12. (a) TG et (b) dTG courbes de BBa, TPo et TPo.d sous atmosphère inerte (N_2) .. 68

Figure 2.13. (a) TG et (b) dTG courbes de BBa, TPo et TPo.d sous atmosphère oxydante (air) 70
Figure 2.14. Températures d'allumage de BBa, TPo, TPo.d et BE 71
Figure 2.15. TG et dTG courbes de la combustion de (a, b) BBa, (c, d) TPo et (e, f) TPo.d à 5, ... 73
Figure 2.16. Tracés des méthodes de Friedman et KAS de (a, d) BBa, (b, e) TPo et (c, f) TPo 75
Figure 2.17. Evolution de l'énergie d'activation en fonction de l'avancement x à partir des modèles de (a) Friedman, (b) KAS et (c) Vyazovkin 78
Figure 2.18. Courbes expérimentales et simulées 81
Figure 2.19. Variation de (a) l'enthalpie (ΔHα), (b) la barrière énergétique (EB), (c) l'enthalpie libre (ΔGα) et l'entropie (ΔSα) en fonction du degré de conversion α 83
Figure 3.1. (a) Presse hydraulique, (b) Accessoires, (c) Système de démoulage 87
Figure 3.2 Test de combustion des briquettes dans le four à moufle 92
Figure 3.3. Biocombustibles briquettes de BBa (a) avec une bonne texture, (b) présentant des fissures 96
Figure 3.4. Graphes d'adéquation du modèle polynomial pour (a) la densité apparente, (b) la résistance à la compression, (c) la vitesse de décomposition thermique et (d) la densité énergétique 97
Figure 3.5. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la densité apparente de BBa suivant le PSR-BB 101
Figure 3.6. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la résistance à la compression de BBa suivant le PSR-BB 102
Figure 3.7. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la vitesse de décomposition thermique de BBa suivant le PSR-BB 103
Figure 3.8. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la densité énergétique de BBa suivant le PSR-BB 104
Figure 3.9. Courbes d'interactions 3D de la densification de BBa 107
Figure 3.10. Biocombustibles briquettes de TPo (a) avec de bonnes textures, (b) présentant des effritements 108
Figure 3.11. Graphes d'adéquation du modèle 2FI pour (a) la densité apparente, (b) la résistance à la compression, (c) la vitesse de décomposition thermique et (d) la densité énergétique ... 109
Figure 3.12. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la densité apparente de TPo suivant le PSR-BB 112

Figure 3.13. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la résistance à la compression de TPo suivant le PSR-BB 113
Figure 3.14. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la vitesse de décomposition thermique de TPo suivant le PSR-BB 114
Figure 3.15. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la densité énergétique des briquettes de TPo suivant le PSR-BB 115
Figure 3.16. Courbes d'interaction 3D de la densification de TPo 118
Figure 3.17. Biocombustibles briquettes optimisées de (a) BBa et (b) TPo 121
Figure 3.18. Propriétés physico-chimiques et pouvoirs calorifiques de BBa et TPo bruts et des briquettes optimisées de BBa et TPo 124
Figure 3.19. Test de combustion des briquettes optimisées dans un foyer de type céramique, (a) début du test, (b) 10 minutes après allumage 125
Figure 3.20. Images MEB de (a), (b) BBa brute et de (c), (d) Briquette optimisée de BBa .. 127
Figure 3.21. Analyse EDX d'une briquette optimisée de BBa 127
Figure 3.22. Images MEB de (a), (b) TPo brut et de (c), (d) briquette optimisée de TPo 128
Figure 3.23. Analyses EDX des briquettes optimisées de TPo 128
Figure 4.1. Liants de densification sélectionnés : (a) Mélasse, (b) Gomme arabique et (c) Amidon de manioc 133
Figure 4.2. Four tubulaire horizontal Thermolab 135
Figure 4.3. Schéma synoptique du dispositif d'analyse des gaz de combustion des biomasses brutes 135
Figure 4.4. (a) Chambre de combustion et (b) Chambre de combustion + four électrique 136
Figure 4.5. Schéma synoptique du dispositif d'analyse des gaz de combustion 137
Figure 4.6. Propriétés physico-chimiques des liants sélectionnés 140
Figure 4.7. Influence de la matière grasse résiduelle sur la densification de TPo 141
Figure 4.8. (a) Briquette de TPo.d présentant des fissures, (b) combustion de TPo et (c) combustion de TPo.d 142
Figure 4.9. Influence de la taille des particules sur la densification de TPo 144
Figure 4.10. Influence du type de liant sur la densification de TPo 145
Figure 4.11. Images MEB des briquettes de TPo produites avec : (a), (b) la mélasse, (c), (d) la gomme arabique et (e), (f) l'amidon de manioc 146
Figure 4.12. Résistances à la compression des briquettes de TPo et BBa produites avec 12,5 % de liant (mélasse) et sans liant 148

Figure 4.13. Composition des gaz de combustion en termes de O_2, CO_2 et CO aux vitesses de chauffe de 5, 10 et 20 °C.min^{-1} 150
Figure 4.14. Analyse en continu des gaz émis par la combustion des briquettes de (a) BBa et (b) TPo et (c) évolution de la température 152
Figure 4.15. Evolution de la concentration de CO dans les gaz de combustion des briquettes de BBa à 100 et 150 % d'excès d'air 154
Figure 4.16. Combustion en (a) phase homogène et en (b) phase hétérogène des briquettes de BBa 154
Figure 4.17. Evolution de la concentration des NOx dans les gaz de combustion des briquettes de BBa en fonction de l'excès d'air 155
Figure 4.18. Influence du type de liant sur l'émission des NOx 157

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Composition élémentaire de différents groupes de biomasses [13] 10
Tableau 1.2. Classification de la biomasse suivant la composition chimique, la condition physique, l'origine et l'utilisation finale [44] 18
Tableau 1.3. Répartition des arbres de karité au Burkina Faso [48] 21
Tableau 1.4. Fonctions de conversion f(α) et g(α) utilisées dans l'approche modélistique [62] 28
Tableau 2.1. Analyses immédiates, quantification de la matière grasse et pouvoir calorifique des biomasses 62
Tableau 2.2. Macromolécules et composition élémentaire des biomasses 63
Tableau 2.3. Composition minérale des cendres des biomasses étudiées 64
Tableau 2.4. Caractéristiques de la pyrolyse de BBa, TPo et TPo.d à 10 °C.min^{-1} 69
Tableau 2.5. Paramètres caractéristiques de la combustion de BBa, TPo, TPo.d et BE à 10 °C.min^{-1} 72
Tableau 2.6. Plages de température utilisées pour l'étude cinétique 74
Tableau 2.7. Energies d'activation E_α de la combustion de BBa, TPo et TPo.d 76
Tableau 2.8. Facteurs pré-exponentiels A_α en fonction de α de la combustion de BBa, TPo et TPo.d 79
Tableau 2.9. Analyse statistique des méthodes de Friedman, KAS et Vyazovkin 80
Tableau 3.1. Domaine expérimental 89
Tableau 3.2 Plan d'expérimentation 90
Tableau 3.3 Résultat du plan Box-Behnken appliqué à la densification de BBa 98
Tableau 3.4. Résultats statistiques d'ajustement du modèle polynomial quadratique 99
Tableau 3.5. Estimation des coefficients et analyse de la variance (ANOVA) 105
Tableau 3.6. Résultats du plan Box-Behnken appliqué à la densification de TPo 110
Tableau 3.7. Résultats statistiques d'ajustement du modèle 2FI 111
Tableau 3.8. Estimation des coefficients et analyse de la variance (ANOVA) 116
Tableau 3.9. Critères d'optimisation imposés aux facteurs 119
Tableau 3.10. Critères d'optimisation imposés aux réponses 120
Tableau 3.11. Conditions optimales de densification de BBa et TPo 120
Tableau 3.12. Réponses optimales prédites et mesurées pour les briquettes de BBa et TPo 123
Tableau 3.13. Paramètres thermiques de la combustion des briquettes optimisées de BBa, TPo et d'autres biocombustibles 126

Tableau 4.1. Formules brutes et masse molaires de BBa et de TPo 148
Tableau 4.2. Calculs théoriques pour la combustion de BBa et TPo bruts à 5, 10 et 20 °C.min^{-1} 149
Tableau 4.3. Calculs théoriques pour la combustion des briquettes de BBa et TPo 151
Tableau 4.4. NOx moyen émis exprimé en ppm et en mg/Nm^3, normalisé à 6 % O_2 156
Tableau 4.5. NOx moyen émis exprimé en ppm et mg/Nm^3 normalisés à 6 % O_2 pour la combustion des briquettes de TPo produites avec différents liants 158
Tableau 4.6. Quantité de bois sauvegardée et gain en CO_2 par usage des briquettes de BBa et TPo 159
Tableau 4.7. Investissement initial suivant le scénario 1 160
Tableau 4.8. Dotation aux amortissements 161
Tableau 4.9. Charges de fonctionnement et d'exploitation du cas 1 162
Tableau 4.10. Prix de revient d'un kilogramme de briquette de BBa 163
Tableau 4.11. Charges de fonctionnement et d'exploitations du cas 2 165
Tableau 4.12. Prix de revient d'un kilogramme de briquette de TPo 166

Liste des sigles et des abréviations

ABASF/E : Association Burkinabé Action Solidarité Femmes/Enfants

ANOVA : Analyse de la variance

ASY : Association Songtaab Yalgré

ATG : Analyse thermogravimétrique

BBa : Boue de barattage ABASF/E

BE : Bois eucalyptus

CNTP : Conditions normales de température et de pression

CO : Monoxyde de carbone

CO_2 : Dioxyde de carbone

DA : Densité apparente

DE : Densité énergétique

dTG : Dérivé thermogravimétrique

Ea : Energie d'activation

EDX : Spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie

EJ : Exajoule

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GW : Gigawatt

HC : Hydrocarbures

ICP-AES : Plasma à couplage inductif - spectrométrie d'émission atomique

ICP-MS : Plasma à couplage inductif - spectrométrie de masse

ICTAC : Confédération internationale pour l'analyse thermique et la calorimétrie

IRENA : Agence Internationale pour les Energies Renouvelables

IRTF : Infrarouge à Transformée de Fourrier

KAS : Kissinger Akahira Sunose

LabEREE : Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique

LEHSA : Laboratoire Eaux Hydro-systèmes et Agriculture

LEMHaD : Laboratoire Eco-matériaux et Habitats Durables

MEB : Microscopie électronique à balayage

MSR : Méthodologie de surface de réponse

MW : Mégawatt

NOx : Oxydes d'azote

PBB : Plan Box Behnken

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

pH : Potentiel hydrogène

PME : Petites et moyennes entreprises

ppm : partie par million

RC : Résistance à la compression

SOTOKACC : Société Toussiana Karité Cosmétiques et Comestibles

TPo : Tourteau de presse

TPo.d : Tourteau de presse déshuilé

USBN : Union des Sociétés Coopératives Beogo Neeré

VDT : Vitesse de décomposition thermique

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes énergétiques de nombreux pays, plus particulièrement dans le domaine de la production d'électricité et de chaleur reposent sur l'utilisation de combustibles solides comme le charbon et le bois. L'augmentation de la population mondiale, la forte urbanisation et la modernisation des différents modes de production entrainent un accroissement de la consommation énergétique. Entre 1990 et 2022, l'approvisionnement mondial en combustible est passé de 92 000 milliards de kWh à près de 155 000 milliards de kWh avec une forte domination des sources d'énergie fossile [1]. Cependant, l'utilisation des combustibles d'origine fossile contribue à la pollution atmosphérique à travers les émissions de GES. Par exemple, bien que le charbon soit une source d'énergie bon marché pour de nombreux pays, son utilisation contribue fortement aux émissions de CO_2 dans l'atmosphère. Face à cette situation, des mesures sont prises dans de nombreux pays pour développer des sources d'énergie alternatives moins polluantes telles que celles des énergies renouvelables. D'autre part, le bois énergie dont près de 75 % de la population dans la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne dépendent contribue malheureusement à la déforestation et à la dégradation de la biodiversité [2]. Pourtant, la consommation de combustibles solides à des fins énergétiques demeure à la hausse dans ces pays où l'énergie est encore difficile d'accès et où les combustibles tels que le bois sont économiquement viables et localement disponibles.

Dans de nombreux pays de l'Afrique subsaharienne, le domaine agro-alimentaire constitue un pilier essentiel de l'économie et représente également l'une des principales sources de résidus organiques. Ces résidus sont générés à différentes étapes de la chaîne de production alimentaire ; il s'agit notamment des coques d'anacarde, des tourteaux des amandes de karité, des noyaux de mangues, des balles de riz, des effluents liquides, etc. Ce flux de résidus organiques qui représente un gisement énergétique souvent non valorisé, pourrait répondre aux besoins en énergie des unités de transformation agroalimentaire [3,4]. En effet, ces résidus sont une source potentielle de biomasse susceptible d'être convertie en énergie sous forme de chaleur par combustion, gazéification ou méthanisation.

L'arbre à noix de karité, connu sous le nom de *Vitellaria paradoxa*, est une plante répartie dans 23 pays de l'Afrique subsaharienne. Le fruit de cet arbre est constitué de deux parties : la pulpe comestible et l'amande contenant environ 55 % de beurre de karité. La production d'amandes de karité du Burkina Faso, deuxième producteur mondial, est de l'ordre de 400 000 tonnes/an contribuant de manière significative à son développement socio-économique [5]. Le beurre de

karité est extrait de l'amande par deux techniques, le barattage et le pressage mécanique. Quelle que soit la technique de production, le procédé requiert un apport d'énergie sous forme de chaleur et le bois de chauffe est le combustible communément utilisé pour satisfaire ce besoin énergétique. Selon Dao et al. [6], la quantité de bois utilisée sur les différentes étapes du processus de production d'un kilogramme de beurre de karité, c'est-à-dire le lavage, la torréfaction et la cuisson, est estimée à près de 4,5 kg. Cependant, la production du beurre de karité génère des quantités importantes de sous-produits, notamment les tourteaux de presse ou les boues de barattage, représentant entre 45 et 60 % de la masse des amandes [7]. Ces résidus qui sont inadaptés à certaines technologies de bioénergie (foyers à combustion, torréfacteurs, gazogènes, etc.) représentent un risque de pollution environnementale majeur et leur gestion constitue un défi considérable pour les unités agro-industrielles.

La caractérisation physico-chimique fine et l'étude des cinétiques de décomposition thermique de ces résidus peuvent permettre de définir des stratégies plus performantes pour leur valorisation énergétique. La cinétique de décomposition thermique de la biomasse peut être étudiée par simulation des vitesses de décomposition thermique à partir de modèles cinétiques appropriés. À cet égard, deux approches de modèles ont été développées, à savoir l'approche isoconversionnelle et l'approche modélistique [8].

Le deuxième défi majeur pour améliorer la valorisation énergétique de ces résidus réside dans leur homogénéisation, un processus clé qui passe par leur densification sous forme de briquettes combustibles. La densification consiste à compacter les matériaux avec ou sans ajout de liant pour ainsi former des biocombustibles briquettes de taille et de densité uniformes. Elle joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la conversion énergétique des résidus, car elle permet, d'une part, d'augmenter leur capacité thermique volumique, et d'autre part, d'améliorer leur maniabilité, facilitant ainsi leur stockage et leur transport.

Cette thèse s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, qui vise à la fois à diminuer l'impact environnemental des déchets en les valorisant de manière durable, et à offrir une source d'énergie accessible. Ainsi, l'objectif principal de ces travaux de recherche est d'étudier, d'une part, le comportement thermochimique, et d'autre part, la valorisation énergétique en biocombustibles briquettes des boues de barattage et des tourteaux de presse provenant de la transformation des amandes de karité, afin de réduire la consommation du bois des unités de transformation agro-industrielles.

De façon spécifique, il s'agira :

- D'étudier le comportement thermochimique des boues de barattage et des tourteaux de presse, deux résidus respectivement obtenus par les méthodes de barattage et pressage mécanique des amandes de karité ;
- D'optimiser par un plan de surface de réponse, la formulation des biocombustibles briquettes de boues de barattage et de tourteaux de presse ;
- D'investiguer l'influence de la matière grasse résiduelle, la taille des particules et des liants sur les propriétés physico-chimiques et la composition des gaz de combustion des biocombustibles briquettes de ces résidus.

Le présent manuscrit de thèse est organisé en quatre chapitres :

- Dans un premier temps, le chapitre 1 présente la revue bibliographique. Il aborde notamment les généralités sur les combustibles solides et les voies de valorisation énergétique de la biomasse. Ensuite, le potentiel que représentent les résidus générés par la transformation des amandes de karité et les méthodes d'étude cinétique de la biomasse sont présentés. Enfin, les technologies de densification et les généralités sur les plans d'expérience sont décrites puis une analyse critique de la valorisation énergétique des résidus de transformation des amandes de karité est effectuée.
- Le chapitre 2 est relatif à la réactivité thermochimique des résidus de transformation des amandes de karité. Il décrit la caractérisation physicochimique, macromoléculaire et minérale des différentes biomasses sélectionnées puis leur décomposition thermique en milieu inerte et oxydant. L'étude cinétique en phase solide de ces résidus y est également présentée ainsi que la détermination de leurs paramètres thermodynamiques.
- Le chapitre 3 traite de la densification de ces résidus en biocombustibles briquettes. Il décrit les effets des paramètres de densification sur la qualité des briquettes produites et les conditions optimales permettant à ces dernières de combiner à la fois de bonnes propriétés mécaniques et thermiques.
- Le chapitre 4 présente l'influence de la matière grasse résiduelle, la taille des particules et des liants sur la densification des tourteaux de presse. Il décrit également les méthodes et les résultats de l'analyse des gaz de combustion des résidus bruts et des biocombustibles briquettes optimisées produites. Puis, ce chapitre aborde l'étude financière et l'impact que la valorisation des résidus de transformation des amandes de karité pourrait avoir sur les unités de transformation des amandes de karité.

Chapitre 1 :
Revue bibliographique

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Introduction

La transformation agroalimentaire, en tant que secteur clé de l'économie mondiale, requiert une quantité importante d'énergie pour assurer ses divers processus de production et conservation des produits. Parmi les différentes sources d'énergie utilisées, les combustibles solides jouent un rôle essentiel, notamment dans les processus thermiques tels que la torréfaction, la cuisson, la stérilisation, la déshydratation ou la production de vapeur.

Les combustibles solides, tels que le bois et le charbon, sont couramment utilisés dans les unités de transformation agroalimentaire pour la production de chaleur. Toutefois, leur utilisation présente des impacts environnementaux importants, notamment en raison du risque de déforestation et de perte de biodiversité. En parallèle, elles génèrent de vastes quantités de résidus issus des différents procédés de production et de conditionnement. Ces sous-produits incluent des co-produits agricoles, des écorces, des noyaux de fruits, des tiges de végétaux, des pelures, ainsi que divers autres déchets organiques. Bien que ces résidus constituent des biomasses potentiellement valorisables en énergie, en particulier pour la production de chaleur via des technologies de bioénergie, leur exploitation reste limitée. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette situation, principalement, la complexité de ces résidus et leur incompatibilité avec certaines technologies de valorisation énergétique. En effet, ces résidus varient considérablement en termes de composition chimique, de teneur en humidité et de caractéristiques physiques, ce qui complique leur traitement et leur transformation en énergie. Ensuite, un autre défi réside dans l'inadaptation de ces résidus aux technologies de bioénergie disponibles. Ainsi, une valorisation optimale de cette biomasse passe par la compréhension des phénomènes thermochimiques qui se déroulent durant sa décomposition.

Cette revue bibliographique présente l’état des besoins énergétiques mondiaux, les généralités sur les combustibles, les voies de valorisation de la biomasse et sa composition ainsi que le potentiel que représentent les résidus générés par la transformation des amandes de karité au Burkina Faso. Ensuite, les généralités sur la cinétique de décomposition thermique des biopolymères de la biomasse ainsi que les moyens de densification de celle-ci pour une meilleure valorisation énergétique sont également abordés. Enfin, seront présentées, une analyse critique portant sur les études portant sur la valorisation énergétique des résidus de transformation des amandes de karité, les limites de ces études ainsi que les questions qui sous-tendent ce présent projet de recherche.

1.1 Besoins énergétiques

Depuis de nombreuses années, la population mondiale ne cesse de croître. Elle est passée d'environ 2,6 milliards d'habitants dans les années 1950 à près de 8,2 milliards de personnes en 2024. Cette forte augmentation de la population s'accompagne par une urbanisation galopante et un accroissement aussi bien de la consommation en nourriture que de la demande énergétique. L'approvisionnement énergétique mondial qui se chiffrait à environ 364 EJ en 1990 a presque doublé en 2022 pour atteindre plus de 622 EJ avec une forte domination des sources d'énergie fossile (Figure 1.1). En 2022, l'ensemble constitué par le pétrole, le charbon et le gaz naturel représentait plus de 80 % du mix énergétique de l'ensemble des pays du monde. En outre, la consommation d'énergie sous forme de chaleur a représenté 50 % de la consommation énergétique mondiale totale en 2018 avec plus de la moitié issue du secteur industriel suivi de près par le secteur de la construction (46 %) et de loin par celui de la cuisson [1]. Même si l'utilisation de la biomasse occupe la première place dans le secteur de la cuisson en Afrique subsaharienne, la production de chaleur à l'échelle mondiale reste largement dominée par l'utilisation des sources d'énergie fossile. Or, ces sources d'énergie sont non renouvelables et contribuent énormément aux émissions de gaz à effets de serre (GES), responsables du réchauffement et du dérèglement climatique. Selon le sixième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) parut en 2023, les émissions de GES ont atteint 59 Gt de CO_2-éq en 2019, soit 12 % de plus qu'en 2010 et 54 % de plus qu'en 1990. Sur ces dix dernières années, 86 % de cette augmentation est due aux combustibles fossiles [9].

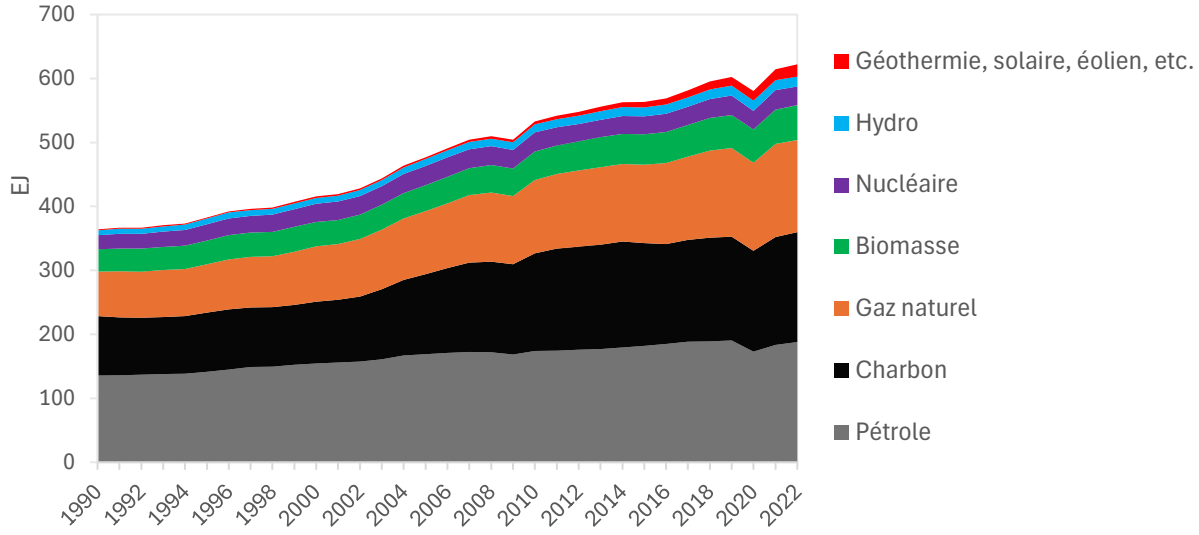


Figure 1.1. Évolution de l'approvisionnement énergétique mondial de 1990 à 2022 [1]

1.2 Généralités sur les combustibles

Les combustibles sont des matières capables de brûler pour produire de l'énergie sous forme de chaleur. Ils libèrent leur énergie soit par une réaction chimique telle que la combustion, soit par fission nucléaire [10]. Ils peuvent être sous forme solide (charbons, bois, etc.), liquide (pétrole, huile végétales brutes, etc.) ou gazeuse (gaz naturel, biogaz, etc.).

Les combustibles solides sont des matières qui ne s'écoulent pas, qui se caractérisent généralement par leur forme compacte dans les conditions normales de température et de pression et qui sont utilisées comme source d'énergie par combustion. Ils jouent un rôle crucial dans divers aspects de la civilisation humaine à travers la production de chaleur pour la cuisson, pour la production d'électricité et pour des applications industrielles. On distingue les combustibles solides renouvelables et non renouvelables.

Les combustibles solides non renouvelables, une fois utilisés, ne peuvent se reconstituer qu'à l'échelle des temps géologiques (plusieurs milliers d'années). Ces combustibles dits ''fossiles'' proviennent de la transformation des matières organiques enfouies dans le sol durant plusieurs milliers d'années. Le charbon est le principal combustible solide non renouvelable. Il est une source d'énergie majeure depuis des siècles et alimente les industries, les transports et la production d'électricité. Il est une roche sédimentaire de couleur noire ou brune composée d'un mélange complexe de substances organiques contenant principalement du carbone, de l'hydrogène, et de l'oxygène. Il se présente sous différentes formes ayant des caractéristiques variables notamment la tourbe, le lignite, l'anthracite, etc. L'utilisation massive du charbon et des autres sources d'énergie fossile a entrainé un développement rapide des sociétés humaines (industrialisation, urbanisation, etc.) et une croissance économique mondiale galopante. Cependant, la crise pétrolière de 1973 associée aux importantes émissions de GES liées à leur utilisation ont incité plusieurs pays à se tourner de plus en plus vers des sources d'énergie plus durables telles que les sources d'énergie renouvelable.

Les combustibles solides renouvelables proviennent de la biomasse et ils ont une capacité de renouvellement plus rapide et réalisable à l'échelle du temps humain. Ils comprennent le bois, les produits forestiers, les résidus agricoles et agro-industriels, les déchets communaux, etc. Le bois est considéré comme une ressource renouvelable seulement si une quantité équivalente à celle coupée est reboisée. Les combustibles solides renouvelables sont disponibles dans la plupart des pays du monde et ils sont facilement accessibles comparativement au charbon. Depuis les chocs pétroliers des années 1970, les progrès technologiques sur les bioénergies se

sont progressivement accrus, ce qui fait qu'aujourd'hui, elles contribuent au mix énergétique mondial.

1.3 Biomasse et voix de valorisation énergétique

1.3.1 Définition de la biomasse

Le terme « biomasse » renvoie à plusieurs définitions dans la littérature. Il désigne en général l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale ainsi que les résidus organiques générés par les activités anthropiques. La directive 2009/28/CE du Parlement Européen et du conseil de l'Union Européenne définit la biomasse comme étant « la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux».

1.3.2 Formation de la biomasse et cycle du carbone

La biomasse d'origine végétale provient du phénomène de la photosynthèse décrit par la Figure 1.2. Cette dernière est le processus bioénergétique par lequel les végétaux produisent leurs matières organiques sous forme de glucose ($C_6H_{12}O_6$) à partir du dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O) en présence de la lumière. La chlorophylle favorise l'absorption du CO_2 de l'atmosphère, contribuant ainsi à la croissance de la plante. Lorsque les êtres humains et les animaux consomment les végétaux comme nourriture, ces derniers leur transmettent l'énergie chimique qu'ils ont stocké. Ainsi, les déchets provenant des animaux et des êtres humains sont également de la biomasse [11].

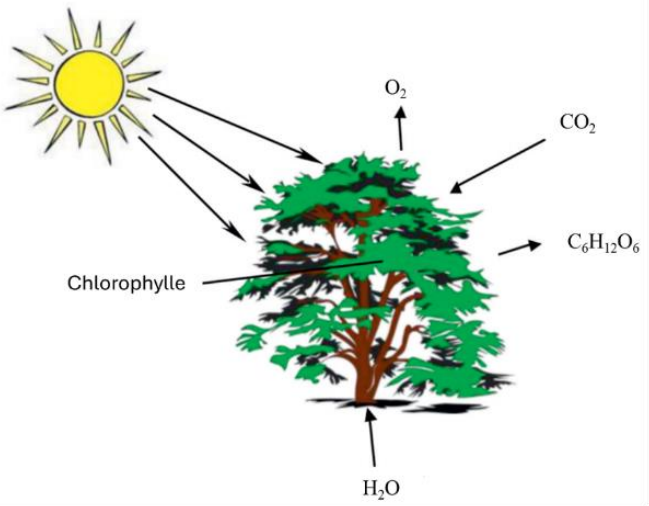


Figure 1.2. Formation de la biomasse d'origine végétale par la photosynthèse [12]

Le processus de la photosynthèse est traduit par l'équation bilan suivant :

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \quad (1.1)$$

La combustion de la biomasse rejette dans l'atmosphère le CO_2 que la plante stocke au cours de sa croissance à travers la photosynthèse. La biomasse-énergie a donc un bilan théorique neutre sur le CO_2 produit. C'est ce cycle qui fait que la biomasse est classée parmi les énergies renouvelables. Cependant, cette neutralité carbone est effective vis-à-vis du climat si à l'échelle d'une année, la quantité de CO_2 captée par les plantes est équivalente à celle émise par la combustion de la biomasse. Il est ainsi indispensable de replanter au moins l'équivalent de la biomasse prélevée à travers le reboisement pour maintenir le potentiel existant.

1.3.3 Composition chimique de la biomasse

1.3.3.1 Composition élémentaire

L'analyse élémentaire de la biomasse indique que ses principaux constituants sont le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O) ; elle contient également de faibles quantités d'azote (N) et de soufre (S). Cette composition élémentaire varie selon le type de biomasse. Le Tableau 1.1 présente la composition élémentaire sur base humide de différents groupes de biomasses. Les valeurs sont exprimées en pourcentage massique. La présence d'azote et de soufre dans la biomasse est à l'origine des émissions de NOx et SOx dans les fumées de combustion.

Tableau 1.1. Composition élémentaire de différents groupes de biomasses [13]

Groupes de biomasse	% C	% H	% O	% N	% S
Biomasse ligneuse	49 - 57	5 - 10	32 - 45	< 1	< 1
Biomasse herbacée et résidus agricoles	42 - 58	3 - 9	34 - 49	< 1 - 3	< 1
Biomasse aquatique	27 - 43	4 - 6	34 - 46	1 - 3	1 - 3
Biomasse animale	57 - 61	7 - 8	21 - 25	6 - 12	1 - 2
Mélange de biomasses	45 - 71	6 - 11	16 - 46	1 - 6	< 1 - 2

La représentation graphique du ratio atomique H/C en fonction du ratio O/C sur base sèche sans cendre (daf) de tous les types de combustibles allant du charbon minéral anthracite (très riche en carbone) à la biomasse (moins riche en carbone) est présentée par la Figure 1.3. Ce

graphique, connu sous le nom de diagramme de Van Krevelen, montre que la biomasse présente des ratios H/C et O/C bien plus élevés que ceux des combustibles fossiles. Parmi tous les combustibles hydrocarbonés, la biomasse est celle qui a la teneur en oxygène la plus élevée. Cette importante teneur en oxygène de la biomasse a la particularité de baisser son pouvoir calorifique comparativement aux combustibles fossiles. Par ailleurs, lors de la pyrolyse de la biomasse, l'oxygène se retrouve en grande partie dans les huiles de pyrolyse ce qui limite de fait, la qualité de ces dernières pour une utilisation comme carburant moteur. Il consomme également une partie de l'hydrogène de la biomasse pour produire de l'eau, et donc la teneur élevée en H/C ne se traduit pas par un rendement gazeux élevé.

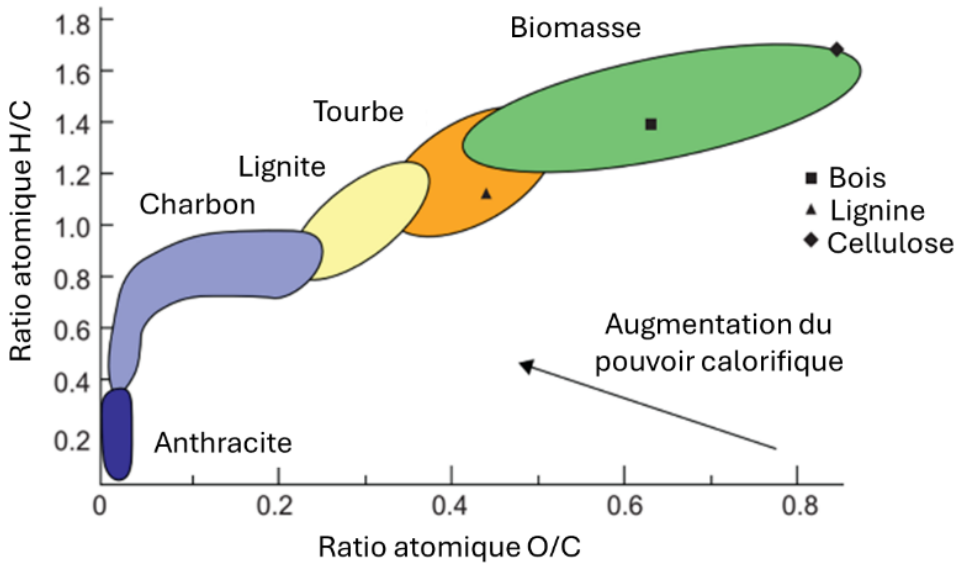


Figure 1.3. Diagramme de Van Krevelen des combustibles fossiles solides et de la biomasse [14]

1.3.3.2 Composition structurale

La paroi cellulaire de la biomasse est essentiellement constituée de trois biopolymères, à savoir la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, formés par la combinaison du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène. Les constituants de la biomasse sont interconnectés les uns aux autres par de nombreuses liaisons covalentes et non covalentes formant une structure très complexe [15].

- **La cellulose**

La cellulose est un homopolysaccharide (glucide complexe) à longue chaîne linéaire formée par plusieurs unités de D-glucose, liées par des liaisons β-1,4-glycosidiques. Le motif de répétition de sa structure est le 4-o-β-D-glucopyranosyl-D-glucopyranose, appelé cellobiose (Figure 1.4). Le degré de polymérisation de la cellulose dépend de l'origine de celle-ci et peut atteindre plus de 5000 [16]. Sa formule brute est $(C_6H_{10}O_5)_n$ où n représente le degré de

polymérisation. La cellulose est le composé organique le plus répandu sur terre et représente le principal composant structurel des parois cellulaires de la biomasse. Sa quantité vaut environ 90 et 40 - 44 % respectivement dans le coton et le bois. Selon le degré d'organisation de sa structure, la cellulose est composée de phases cristallines (hautement ordonnées) et amorphes (distribuées de manière aléatoire) [17]. Dans son état naturel, la cellulose est fibrillaire et sa phase cristalline est thermiquement plus stable que sa phase amorphe. En outre, des auteurs tels que Worasuwannarak et al. [18] ; Yang et al.] ; Lv et Wu [19] puis Collard et Blin [20] ont montré que l'essentiel de la décomposition thermique de la cellulose a lieu dans la gamme de température 300 - 390 °C.

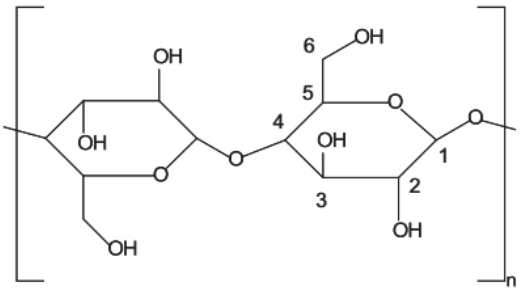


Figure 1.4. Motif de répétition de la cellulose : 4-o-β-D-glucopyranosyl-D-glucopyranose [21]

❖ **Les hémicelluloses**

Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides de structures amorphes dont la composition varie significativement en fonction de la biomasse. Contrairement à la cellulose, les hémicelluloses ont des chaînes moins longues (degré de polymérisation inférieur à 200) mais sont en revanche davantage ramifiées. La Figure 1.5 montre les unités monosaccharidiques les plus représentées des hémicelluloses. Ces monosaccharides contiennent des pentoses, des hexoses, des acides uroniques et des désoxy-hexoses. Les hémicelluloses sont plus thermosensibles que la cellulose et ils ont tendance à produire des quantités élevées de gaz et moins de goudrons que cette dernière [22]. L'essentielle de leur décomposition thermique a lieu à des températures comprises entre 200 et 350 °C [20,23,24]. Par ailleurs, ils sont solubles dans des solutions alcalines faibles et sont facilement hydrolysés par un acide ou une base diluée.

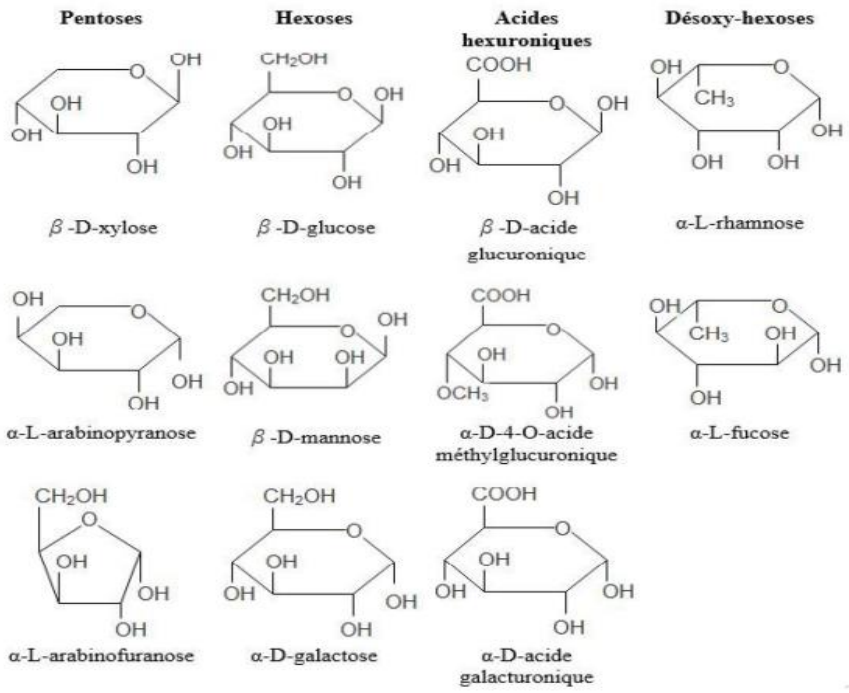
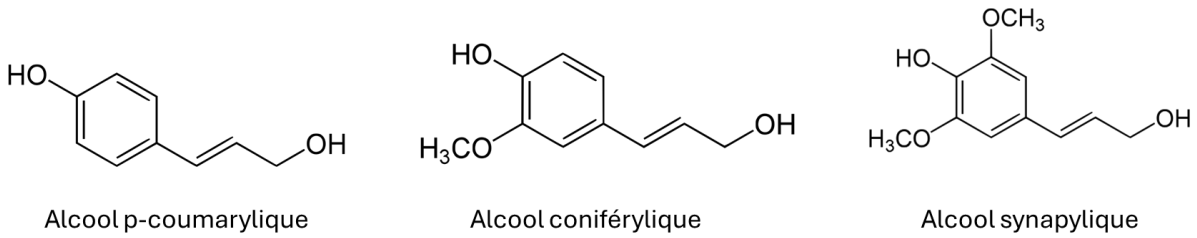


Figure 1.5. Principaux monomères des hémicelluloses [25]

❖ **La lignine**

La lignine est un polymère non saccharidique (polymère aromatique) amorphe qui provient de la polymérisation de trois alcools phénoliques, à savoir l'alcool p-coumarylique, l'alcool conifé rylique et l'alcool synapylique (*Figure 1.6*). Une fois polymérisés, ces alcools (monolignols) sont respectivement nommés unité p-hydroxyphényle (H), unité guaïacyle (G) et unité syringyle (S) [26]. Ces unités se différencient par le nombre de groupes méthoxy (-O-CH_3) sur leur cycle benzénique [27] ; l'unité H n'en possède pas, l'unité G en possède un et l'unité S en possède deux. Les proportions des unités monomères sont très variables et dépendent principalement de la composition lignocellulosique des espèces. Ces unités sont liées par différentes liaisons éther et carbone-carbone dont les plus courantes sont β-O-4', 4-O-5', α-O-4', β–β', β-5', β-1', 5-5' [28,29]. La lignine est le deuxième biopolymère le plus abondant dans les matières végétales après la cellulose. Contenue dans les parois cellulaires des plantes, elle permet de lier, cimenter et assembler les fibres afin d'améliorer la compacité et la résistance de la structure végétale. Son hydrolyse nécessite des acides ou bases fortes. La décomposition thermique de la lignine se déroule sur une large plage de températures allant de 200 à 450 °C, avec le taux de décomposition le plus élevé, généralement compris entre 360 et 400 °C.



Alcool p-coumarylique | Alcool coniférylique | Alcool synapylique

Figure 1.6. Monomères de la lignine [30]

1.3.3.3 Les extractibles

Les extractibles sont des composés chimiques naturels de la biomasse qui peuvent être extraits par certains solvants. En fonction du solvant utilisé dans le processus d'extraction, les extractibles peuvent être classés comme des extractibles solubles dans l'eau, dans le toluène, l'éthanol et dans l'éther. Ils peuvent être des lipides (acides gras, mono-, di- et triglycérides), des protéines, des hydrocarbures (terpènes), des composés phénoliques (tanins), des glucides (sucres, amidons), des alcools, des cires et des résines [31,32].

1.3.3.4 Les matières minérales

La biomasse contient en plus des extractibles et des éléments structuraux, des substances inorganiques, dont la quantité varie selon le type de matière première [33]. La présence des éléments inorganiques majeurs (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe et Mn) et traces (Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V et Hg) exerce une forte influence sur la conversion thermochimique de la biomasse. Une teneur élevée en chlore entraîne l'émission de dioxines et la corrosion des matériaux. L'oxydation du soufre produit des oxydes de soufre (principalement SO_2) qui, combinés à la vapeur d'eau génèrent de l'acide sulfurique contribuant à la formation de pluies acides [34]. Par conséquent, la connaissance de la composition d'une biomasse en éléments inorganiques est essentielle pour le contrôle des processus de conversion énergétique de cette biomasse et pour une meilleure gestion des résidus qui en résultent [35].

1.3.4 Voies de valorisation énergétiques de la biomasse

La biomasse est un combustible difficilement exploitable à des fins énergétiques dans son état brut. Sa transformation à travers différents processus de conversion aboutit à des vecteurs énergétiques sous forme :

- Solide comme les briquettes, les pellettes, le charbon végétal, etc.
- Liquide comme le bioéthanol, le biodiesel, les huiles pyrolytiques, etc.
- Gazeuse comme les gaz de décharge, le biogaz, l'hydrogène, le syngas, etc.

Les voix de conversion énergétique de la biomasse peuvent être classées en trois principaux groupes, à savoir la voie thermochimique, la voie biochimique et la voie d'extraction mécanique (ou au solvant) d'huile végétale (Figure 1.7). Les facteurs qui déterminent le choix de la voie de conversion énergétique de la biomasse sont divers, mais les plus importants concernent le type d'énergie finale souhaitée, la qualité et la quantité de biomasse disponible et le coût du procédé de conversion énergétique [36]. La qualité de la biomasse dépend de ses caractéristiques physicochimiques telles que la teneur en humidité, le pouvoir calorifique, les proportions en matière volatile et carbone fixe, les teneurs en cendre et en métaux alcalins, puis le ratio cellulose/lignine. Ces propriétés jouent un rôle crucial dans l'orientation de la matière première disponible vers l'une ou l'autre voix de valorisation énergétique. Les cinq premières propriétés ont une grande influence sur la conversion de la biomasse sèche, alors que la première et la dernière sont essentielles pour les processus de conversion de la biomasse humide [37].

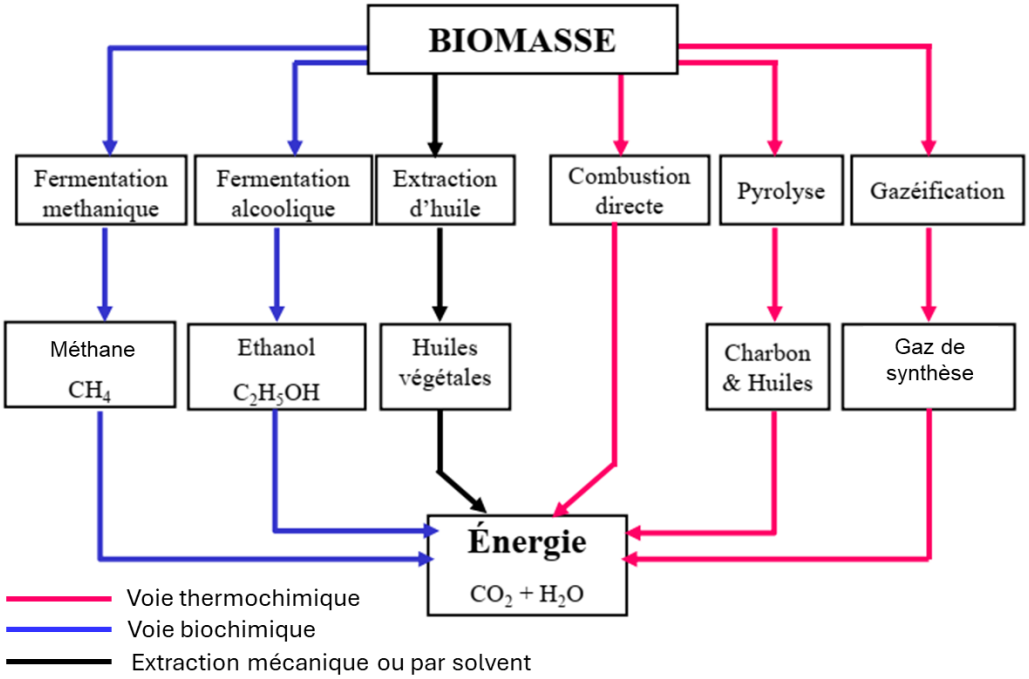


Figure 1.7. Principales voies de valorisation énergétique de la biomasse [12]

1.3.4.1 Voies de conversion biochimique de la biomasse

Les processus de conversion biochimique conduisent à la décomposition de la biomasse en glucides qui sont ensuite convertis en carburants liquides (bio-alcools) ou en biogaz, ainsi qu'en différents types de bioproduits par l'action d'agents biologiques tels que des bactéries, les enzymes, etc. La fermentation méthanique est la transformation de la biomasse en biogaz

(méthane en grande proportion) par une communauté microbienne naturelle rencontrée dans les matières organiques. La fermentation alcoolique conduit quant à elle à la production de bio-alcools.

1.3.4.2 Extraction mécanique ou au solvant des huiles végétales

L'huile végétale contenue dans les biomasses oléagineuses peut être extraite mécaniquement par pressage des amandes ou par usage d'un solvant d'extraction approprié suivi d'une étape de séparation solvant-huile. Après quelques étapes de purification (décantation et filtration), l'huile végétale extraite peut être utilisée dans les moteurs diesel après quelques modifications de ceux-ci ou utilisée pour produire du biodiesel par transestérification [38]. Le biodiesel obtenu peut alors être utilisé directement dans les moteurs diesels.

1.3.4.3 Voies de conversion thermochimique de la biomasse

Les voies de conversion thermochimique de la biomasse combinent à la fois une conversion thermique, c'est-à dire qu'elle se déroule sous l'effet de la chaleur et une conversion chimique, c'est-à dire qu'elle implique des réactions chimiques entre les constituants de la biomasse. La décomposition thermique qui en résulte a lieu dans un environnement gazeux spécifique. La pyrolyse, la combustion et la gazéification constituent les principaux procédés de conversion thermochimique de la biomasse telle qu'illustrée par la Figure 1.7. Ces procédés sont généralement précédés par les étapes de collecte, de transport et de prétraitement de la biomasse.

- **Pyrolyse**

La pyrolyse de la biomasse est une transformation thermochimique de celle-ci sous l'action de la chaleur dans un environnement inerte ou pauvre en oxygène à des températures comprises entre 300 et 900 °C [39]. Elle conduit à trois types de produits combustibles qui existent sous la forme solide, liquide et gazeuse. La fraction solide est appelée biochar ou charbon ; elle est essentiellement composée de carbone. La fraction gazeuse comprend les gaz condensables dont la liquéfaction conduit à un liquide ayant une phase organique dite bio-huile, goudron ou huile de pyrolyse et une phase aqueuse. La fraction gazeuse comprend également des gaz incondensables tels que CO, CO_2, CH_4, H_2, etc. En modifiant les conditions du processus de la pyrolyse telles que la température finale, la vitesse de chauffe du réacteur et le temps de séjour de la biomasse dans le réacteur, l'une ou l'autre des fractions relatives de charbon, d'huile de pyrolyse et de gaz combustible peut être favorisée [40]. La pyrolyse représente la première étape de toute transformation thermochimique de la biomasse. Ainsi, la connaissance de la composition chimique, le comportement thermique et la réactivité des combustibles de

biomasse lors de la pyrolyse est très importante pour la conception et le fonctionnement efficace des unités de conversion thermochimique [41].

❖ **Combustion**

La combustion ou oxydation vive est une réaction chimique exothermique qui se produit en portant un mélange de comburant et de combustible à une certaine température. Pour qu'il ait combustion, il faut donc trois éléments composant le « triangle de feu » : un combustible, un comburant et une température suffisante pour l'amorçage du processus. La combustion de la biomasse transforme l'énergie stockée dans les liaisons chimiques en chaleur qui peut ultérieurement être utilisée de diverses manières [42]. La réaction produit également du dioxyde de carbone et de l'eau puis de la cendre issue de la partie inorganique de la biomasse. En considérant une biomasse de formule brute $CH_{1,44}O_{0,66}$, l'équation bilan de la réaction de combustion dans l'air s'écrit comme décrite par l'équation 1.2.

$$CH_{1,44}O_{0,66} + 1{,}03\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 3{,}87\ N_2 + Chaleur \qquad (1.2)$$

En théorie, il est possible de brûler tout type de biomasse, mais en pratique la combustion n'est possible que pour les biomasses ayant une teneur en humidité inférieure à 50 %, sinon elle doit être pré-séchée [43]. La combustion de la biomasse est un phénomène complexe impliquant un transfert simultané de chaleur et de masse couplés à des réactions chimiques.

❖ **Gazéification**

La gazéification est un procédé thermochimique de conversion de la biomasse en composés gazeux par injection en faible quantité d'un agent oxydant (O_2, air, CO_2, etc.). Lors de la gazéification, la biomasse subit d'abord une pyrolyse suivie d'une combustion incomplète. Ce procédé vise la formation de gaz dits de synthèse ou syngaz (CO et H_2). Les gaz de synthèse produits peuvent être utilisés soit pour générer de l'énergie électrique, soit pour synthétiser des carburants ou d'autres produits chimiques à l'aide de catalyseurs. La température du processus de la gazéification de la biomasse est généralement supérieure à 800 °C. L'une des caractéristiques les plus attrayantes de la gazéification est sa flexibilité d'application, notamment la production d'énergie thermique, la production d'hydrogène et la synthèse de biocarburants et de produits chimiques. Cela offre la perspective de raffineries basées sur la gazéification, produisant un mélange d'énergie et de produits chimiques ou permettant l'introduction progressive de technologies à mesure qu'elles atteignent la viabilité commerciale.

1.3.5 Classification de la biomasse

La biomasse est de diverses origines, de ce fait, il n'existe pas une classification unique. Selon Sánchez et al. [44], les types de biomasses peuvent être regroupés suivant leur composition chimique, leur condition physique, leur origine et leur utilisation finale. Ces différents groupes sont présentés dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2. Classification de la biomasse suivant la composition chimique, la condition physique, l'origine et l'utilisation finale [44]

Classification de la biomasse suivant la composition chimique		
Types	**Descriptions**	**Exemples**
Biomasse lignocellulosique	Principalement constituée de cellulose, hémicellulose et lignine. On distingue la biomasse ligneuse et herbacée	Bois, paille, herbes, etc.
Biomasse oléagineuse	Riche en lipide	Olive, colza, karité, etc.
Biomasse riche en sucre	Contient des monosaccharides (glucose, fructose) et disaccharides (saccharose)	betterave sucrière et canne à sucre
Biomasse riche en amidon	Contient une grande proportion de polysaccharides (amidon, inuline)	Grains de céréales (blé, maïs, etc.) et tubercules (manioc, patate, etc.)
Biomasse riche en protéine	Provient des plantes oléagineuses, des légumes et des animaux	Tournesol, petit-pois, poisson, viande
Classification de la biomasse suivant la condition physique		
Types	**Descriptions**	**Exemples**
Biomasse humide	Teneur en humidité comprise entre 13 et 90 %	Boues, déjections animales
Biomasse sèche	Teneur en humidité inférieur à 13 %	Bûches, rémanents forestiers
Classification de la biomasse suivant l'origine		
Types	**Descriptions**	**Exemples**
Biomasse de l'agriculture	Produits de l'agriculture comestibles ou non (cultures énergétiques)	Maïs, noix de cajou, jatropha
Biomasse forestière	Bois provenant des forêts	Bois, rémanents forestiers

Biomasse aquatique	Matière végétale ou animale qui s'est formée dans l'eau	Microalgues, algues, jacinthe d'eau
Résidus et déchets	Résidus provenant des activités agricoles, forestières ou industrielles ; déchets organiques des municipalités	Balle de riz, tourteaux de karité, ordures ménagères
Classification de la biomasse suivant son utilisation		
Types	**Descriptions**	**Exemples**
Biomasse pour le transport	Biocarburants utilisés dans le domaine des transports	Bioéthanol, biodiesel, biokérosène, biohydrogène
Biomasse pour la chaleur et la puissance	Biomasse solide, liquide ou gazeuse utilisée pour la production de chaleur, d'électricité ou des deux à la fois (cogénération)	Briquettes, charbon, huile végétale
Biomasse pour la bioraffinerie	Concerne principalement les biomasses riches en sucre, lipide ou amidon	Tourteaux, céréales
Biomasses intermédiaires	Désigne la biomasse transformée contenant de l'énergie qui peut être ultérieurement convertie en d'autres formes d'énergies	Bio-huiles, biomasses torréfiées

Bien que les biomasses soient souvent classées en premier lieu selon leur composition chimique, par exemple en biomasse lignocellulosique, lipidique ou protéique, elles peuvent également être catégorisées selon d'autres critères tout aussi pertinents. Parmi ceux-ci figurent la condition physique (solide ou liquide), l'origine (végétale, animale, ou issue de déchets agricoles, forestiers, industriels ou municipaux), ainsi que l'utilisation finale (production d'énergie, fabrication de matériaux biosourcés, alimentation animale ou compostage, entre autres). Une classification multidimensionnelle permet ainsi une meilleure compréhension et valorisation des différentes formes de biomasse. Dans les pays de l'Afrique subsaharienne, le secteur agricole constitue une source majeure de résidus organiques, souvent sous-exploités. Parmi ces sous-produits figurent notamment la balle de riz, les tiges de mil, les coques d'anacarde ou de karité etc. Cependant, les quantités réelles mobilisables de ces résidus agricoles sont pour la plupart méconnues, ce qui entrave leur valorisation efficace ainsi que le

développement de filières structurées de biocombustibles dans la région. En revanche, les résidus issus de la transformation agroalimentaire présentent un potentiel de mobilisation plus élevé, car ils sont généralement concentrés sur les sites des unités de production. Leur accessibilité est donc facilitée, et ils représentent parfois une source de pollution locale. C'est notamment le cas des sous-produits générés lors de la transformation des amandes de karité, qui s'accumulent en quantités importantes et peuvent poser des problèmes environnementaux s'ils ne sont pas correctement valorisés.

1.4 Le karité

1.4.1 Taxonomie

Le karité, *Vitellaria* paradoxa, aussi dénommé *Butyrospermum parkii* est un arbre fruitier qui pousse sauvagement dans les savanes arborées d'Afrique de l'Ouest, du Centre et de l'Est. Il a une durée de vie de plus de deux siècles et produit généralement des fruits à partir de sa quinzième année. Cependant, il atteint sa pleine production à environ vingt-cinq ans [45]. L'arbre de karité est très convoité pour ses fruits dont l'amande est riche en matière grasse (beurre de karité). Une distinction botanique en deux sous-espèces de l'espèce *Vitellaria paradoxa* est observée dans la littérature : *Vitellaria paradoxa* ssp. *paradoxa* en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Sénégal, Côte d'Ivoire, Mali, etc.) et en Afrique centrale (Cameroun, République Centrafricaine, Tchad, République Démocratique du Congo, etc.) et *Vitellaria paradoxa* ssp. *nilotica* en Afrique de l'Est (Soudan, Ouganda, Éthiopie). Cette distinction taxonomique provient de l'observation de légères variations dans les dimensions des feuilles. Les feuilles de la sous-espèce *nilotica* seraient en effet plus larges que celles de la sous-espèce *paradoxa* [46].

1.4.2 Distribution géographique

L'arbre du karité se retrouve sur une distance d'environ 6000 km et traverse 18 pays de l'Afrique subsaharienne. La sous-espèce *paradoxa* est présente au Sénégal, en Guinée, au Mali, en Côte d'Ivoire, au Ghana, au Burkina Faso, au Togo, au Bénin, au Niger, au Nigéria, au Cameroun, au Tchad et en République Centrafricaine. La sous-espèce *nilotica* se retrouve quant à elle en Éthiopie, au Soudan, en Ouganda et au Congo [47].

Au Burkina Faso, le peuplement d'arbres de karité est d'environ 281 millions d'arbres. Le karité est répandu sur la quasi-totalité du territoire national à l'exception de la région du Sahel. Les peuplements les plus denses sont localisés dans six régions, à savoir les Hauts Bassins (16,19 %), les Cascades (15,65 %), le Centre-Ouest (15,48 %), le Sud-Ouest (14,97 %), l'Est

(12,43 %) et la Boucle du Mouhoun (10,54 %). Le potentiel d'amandes de karité réellement exploité par an au Burkina Faso se chiffre à 404 412 tonnes sur un potentiel théorique total de 1 247 295 tonnes (Tableau 1.3).

Tableau 1.3. Répartition des arbres de karité au Burkina Faso [48]

Région	Peuplement d'arbres de karité		Potentiel		Potentiel réellement exploité
	Nombre de pieds	%	Tonnes d'amandes de karité	%	Tonnes d'amandes de karité
Boucle du Mouhoun	29 586 960	10,54	166 119	13,32	80 060
Cascades	43 935 223	15,65	252 119	20,21	75 636
Centre	2 541 139	0,90	3 099	0,25	930
Centre-Est	8 475 318	3,02	10 335	0,83	3100
Centre-Nord	2 007 043	0,71	2 447	0,20	734
Centre-Ouest	43 455 260	15,48	211 978	17,00	63 593
Centre-Sud	19 819 308	7,06	56 628	4,54	16 988
Est	34 892 868	12,43	42 548	3,41	12 765
Hauts Bassins	45 466 080	16,19	255 274	20,47	76 582
Nord	4 610 532	1,64	5 830	0,47	1 749
Plateau Central	3 965 164	1,41	4 835	0,39	1 451
Sahel	0	0,00	0	0,00	0
Sud-Ouest	42 047 965	14,97	236 083	18,93	70 825
National	280 802 860	100,00	1 247 295	100,00	404 412

1.4.3 Le fruit du karité

Le fruit du karité existe sous trois grandes formes, à savoir ellipsoïdale, oblongue et subglobuleuse [45]. Il atteint généralement la maturité au début de la saison des pluies, lorsque les conditions climatiques sont les plus favorables à la germination des graines [46]. L'épicarpe

du fruit du karité est vert avant maturation et prend une couleur jaunâtre une fois que ce dernier mûrit. La couleur du mésocarpe varie quant à elle du vert au jaunâtre lors de la maturation (Figure 1.8). Une fois la maturité atteinte, le fruit tombe la plupart du temps au sol, souvent aidé par des violents vents. Le fruit du karité est composé de deux parties : une pulpe et une noix.

- La pulpe est comestible et elle est communément utilisée pour la consommation humaine ou l'alimentation animale. Son goût peut être sucré, amer et parfois astringent, auquel cas, il peut être non comestible. La pulpe du karité est particulièrement riche en acide ascorbique (vitamine C) avec une teneur pouvant atteindre ~196 mg/100 g [47]. Puisque le fruit du karité non mûr contient des insaponifiables tels que le latex, la pulpe n'est consommée que lorsque le fruit mûrit.
- La noix présente une surface lisse et brillante ; elle représente environ 50 % de la masse du fruit frais. Elle comporte deux couches, à savoir une coque brune qui enveloppe une amande oléagineuse qui contient environ 55 % de beurre de karité [49]. L'amande de karité provenant d'un fruit frais peut contenir jusqu'à 60 % d'humidité. Il est donc essentiel qu'elle soit séchée pour éviter une détérioration lors du stockage. La qualité des amandes de karité est régie par leur teneur en acides gras libres ; plus cette teneur est faible meilleure sera la qualité du beurre produit. Ces acides gras libres proviennent de la dégradation de la matière grasse par des enzymes lipolytiques en présence de molécules d'eau [47].

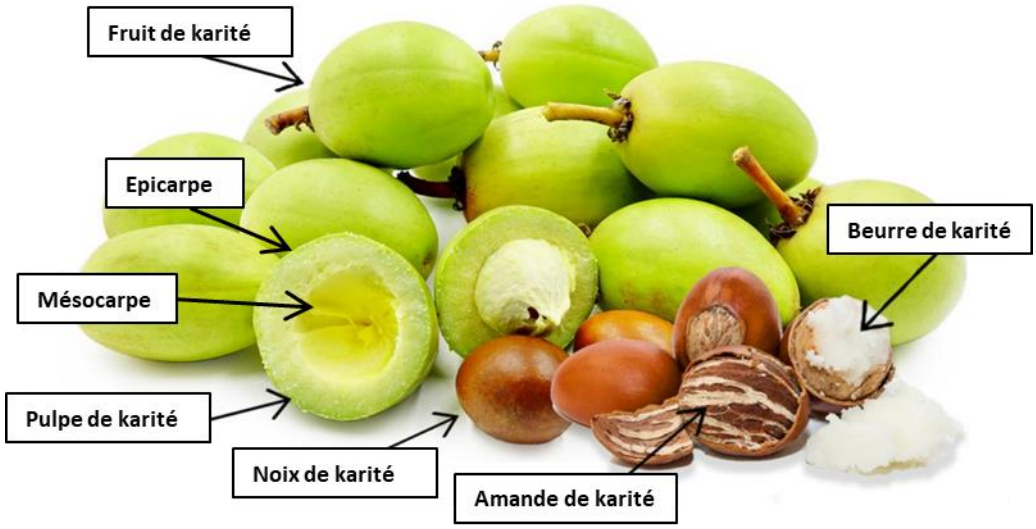


Figure 1.8. Fruits du karité

1.4.4 Production du beurre de karité

Une fois que les fruits de karité atteignent leur maturation, ils sont récoltés et dépulpés. Les noix de karité ainsi obtenues sont triées pour ne retenir que celles qui sont en bon état. Ces

dernières sont ensuite nettoyées et la plupart du temps bouillies pour désactiver les enzymes de germination d'une part et faciliter la décortication d'autre part. Enfin, elles sont séchées et décortiquées par craquage à l'aide de mortiers ou de bâtons. Les amandes de karité qui sont finalement obtenues représentent la matière première dans les usines et coopératives de fabrication du beurre de karité. La matière grasse contenue dans ces amandes peut, d'une façon générale, être extraite suivant trois techniques, à savoir l'extraction au solvant, le pressage mécanique et le barattage. La technique d'extraction au solvant (hexane, éther de pétrole) permet d'obtenir les meilleurs rendements d'extraction, mais elle n'est pas utilisée au Burkina Faso à cause du solvant chimique dont elle requiert. Les deux dernières techniques (pressage mécanique et barattage) sont celles qui sont généralement rencontrées dans les unités de transformation des amandes de karité au Burkina Faso et dans la plupart des autres pays de l'Afrique subsaharienne.

1.4.4.1 Production du beurre de karité par pressage mécanique des amandes de karité

Cette technique est généralement rencontrée à l'échelle semi-industrielle ou industrielle. Ici, les amandes de karité obtenues sont concassées, séchées puis pressées soit à froid, soit à chaud.

- Lors du pressage à froid, les amandes de karité sont pressées à une température inférieure à 80 °C à l'aide d'une presse mécanique pour extraire l'huile de karité. L'inconvénient majeur de ce procédé est qu'il a un rendement relativement faible [50] comparativement au procédé à chaud. Ainsi, les résidus obtenus, appelés tourteaux de presse contiennent un taux encore plus élevé de matière grasse résiduelle.
- Lors du pressage à chaud, les amandes de karité sont préchauffées à une température de 90-100 °C (torréfaction) puis pressées par une presse mécanique pour extraire l'huile de karité. À la fin du processus, on obtient, en plus du beurre de karité, des tourteaux de presse sous forme de résidus.

L'huile de karité obtenue est généralement raffinée par neutralisation, décoloration, désodorisation, fractionnement, hydrogénation, dégommage, etc. en fonction des applications visées.

1.4.4.2 Production du beurre de karité par la méthode de barattage

Cette méthode est la plus communément rencontrée dans les coopératives au Burkina Faso ; elle est généralement qualifiée de « traditionnelle ». Cependant, plusieurs étapes du procédé, autrefois manuelles, se mécanisent de plus en plus, c'est le cas notamment de la torréfaction et du barattage. Il existe quelques variations régionales ou ethniques relatives aux différentes étapes constitutives de la technique de barattage, mais les étapes de base restent identiques. Les

différentes étapes de la technique rencontrée dans une coopérative de la place sont décrites ci-dessous :

- Concassage des amandes de karité : cette opération consiste à réduire les amandes en des morceaux plus fins à l'aide d'un concasseur électrique.
- Séchage : les amandes concassées sont séchées sous atmosphère ambiante
- Torréfaction : les amandes concassées et séchées sont torréfiées dans des torréfacteurs ou des marmites pour permettre un meilleur taux d'extraction du beurre de karité. Cette étape a une grande influence sur la qualité, le rendement d'extraction, la couleur et l'odeur du beurre de karité produit [51,52]. Elle se déroule dans des conditions bien précises de temps et de température : 30 à 60 minutes à 105 °C selon Lambert [52], puis 15 minutes à 170 °C selon Kpegba et al. [53].
- Mouture : les grains d'amandes torréfiées sont broyés à l'aide d'un moulin pour obtenir une poudre pâteuse homogène.
- Malaxage : Après refroidissement de la pâte, de l'eau y est ajoutée et l'ensemble est ensuite malaxé manuellement. Cette étape permet d'homogénéiser le mélange pâte-eau à l'aide d'un mouvement circulaire de la main, entrecoupé de pétrissage de la pâte entre les doigts.
- Barattage : cette étape suit immédiatement le malaxage. elle consiste à battre la pâte à l'aide d'une baratte à un rythme énergique et régulier, jusqu'à ce qu'elle blanchisse. La pâte d'amande est mise dans une baratte, de l'eau chaude (ou froide selon le cas) est ajoutée au fur et à mesure du barattage pour maintenir le mélange à un niveau de température compris entre 28 et 37 °C [54]. On obtient une émulsion de couleur brune contenant des impuretés et des résidus appelés boues de barattage.
- Lavage : l'émulsion obtenue est mélangée avec de l'eau pour éliminer les impuretés. Il s'agit de remuer et de pétrir l'émulsion à la main tout en effectuant un mouvement circulaire du bras et en ajoutant une grande quantité d'eau pour séparer les impuretés de la matière grasse qui flotte à la surface. L'opération est répétée trois fois et à la fin l'émulsion brune devient blanchâtre. Cette étape permet de préserver le gout et la qualité du beurre de karité.
- Cuisson : elle consiste à chauffer la pâte obtenue après lavage pour séparer l'huile de l'eau et des dernières matières solides qu'elle contient. À la fin de la cuisson, la matière grasse, moins dense, est séparée à chaud de la partie aqueuse, plus dense. La séparation

est généralement réalisée à l'aide d'une cuvette ou d'une calebasse par raclage de la matière grasse en surface.

- Décantation et séparation : à cette étape, l'huile de karité est filtrée et stockée toute une nuit dans des bassines pour décantation. L'huile obtenue le lendemain est plus claire et les sédiments se retrouvent au fond de la bassine. Ces derniers sont alors séparés de l'huile par filtration.
- Conditionnement : la matière grasse obtenue se solidifie à des températures inférieures à 32 °C. Le beurre de karité solide est conditionné dans des sacs plastiques puis dans des cartons.

Le rendement de la méthode de production du beurre de karité par barattage varie de 10 à 34 % en fonction de la qualité des amandes et de l'efficacité des différentes étapes du procédé [55].

La production de beurre de karité par ces deux méthodes génère des résidus qui sont les tourteaux de presse issus du pressage mécanique et les boues de barattage issues du barattage. Ces résidus sont très peu valorisés et bien que de nombreuses études se soient portées sur la valorisation énergétique de la biomasse [56-60], rares sont celles qui s'y sont intéressées.

1.5 Aspects généraux de la cinétique de décomposition thermique de la biomasse

La cinétique est l'étude des vitesses de réactions chimiques. La cinétique de la décomposition thermique des solides est abordée dans ce paragraphe. L'objectif est de décrire le comportement global d'un solide, notamment la biomasse solide soumise à un programme de température donnée.

La cinétique de décomposition thermique de la biomasse peut être étudiée par simulation des vitesses de décomposition thermique à l'aide de modèles cinétiques appropriés. Les paramètres cinétiques de la décomposition thermique ainsi obtenus sont non seulement essentiels pour la prédiction des performances de cette biomasse, la modélisation des chambres de combustion et des pyrolyseurs mais également l'optimisation des paramètres de fonctionnement. D'ailleurs, Akor et al., (2021) [61] rapportent que les paramètres cinétiques d'une biomasse interviennent dans la conception de réacteurs utilisant cette biomasse comme combustible et aident à l'optimisation du système.

Soit la réaction de décomposition thermique suivante :

$$aA_{solide} \rightarrow bB_{solide} + cC_{gaz} \qquad (1.3)$$

La vitesse de cette réaction est fonction de la température (T) et du degré de conversion (α). Elle est décrite par l'équation différentielle (1.4) :

$$v = \frac{d\alpha}{dt} = k(T).f(\alpha) \qquad (1.4)$$

k(T) est la constante de vitesse de réaction. Elle est exprimée par l'équation d'Arrhenius (1.5)

$$k(T) = A.exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \qquad (1.5)$$

Où : *A*, *E*, *R* et *T* sont respectivement le facteur pré-exponentiel (s^{-1}), l'énergie d'activation ($kJ.mol^{-1}$), la constante des gaz parfaits (8,314 $J.mol^{-1}K^{-1}$) et la température (K).

f(α) est la fonction du modèle de réaction. Cette fonction est généralement décrite par l'équation (1.6) pour la décomposition thermique des biomasses.

$$f(\alpha) = (1-\alpha)^n \qquad (1.6)$$

Où : *n* représente l'ordre de la réaction et *α* est l'avancement de la réaction (ou degré de conversion). Il est fonction du temps et est défini par l'expression :

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_{tf}} \qquad (1.7)$$

Où : m_0 est la masse initiale de la biomasse, m_t, la masse de biomasse à un instant t de la décomposition thermique et m_{tf}, la masse résiduelle de biomasse à la fin de la décomposition thermique. α est sans dimension et appartient à [0,1].

Lorsque les analyses thermogravimétriques sont réalisées sous un régime dynamique avec une vitesse de chauffe définie par $\beta = \frac{dT}{dt}$, en considérant l'expression de la constante de vitesse *k(T)*, l'équation (1.4) est réécrite pour obtenir la forme différentielle suivante de la loi cinétique:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta}.exp\left(\frac{-E}{RT}\right).f(\alpha) \qquad (1.8)$$

En réarrangeant et en intégrant l'équation (1.8), on obtient une forme intégrale de la loi cinétique :

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta}\int_{T0}^{T} exp\left(\frac{-E}{RT}\right) dT \qquad (1.9)$$

Ces deux équations (1.8) et (1.9) lient la vitesse de réaction au triplet cinétique (*A*, *E* et *f(α)/g(α)*). Chaque paramètre cinétique est associé à un concept théorique fondamental.

A (s^{-1}) étant le facteur pré-exponentiel, il dépend de la température et indique la probabilité qu'une réaction apparente se produise. Plus la valeur de A est élevée, plus la réaction de décomposition thermique se déroule rapidement et facilement.

E ($kJ.mol^{-1}$) est l'énergie d'activation ; elle représente l'énergie nécessaire pour briser les liaisons moléculaires. C'est la barrière énergétique à franchir par les molécules de la biomasse pour déclencher les réactions de décomposition. Plus la valeur de l'énergie d'activation est faible, plus l'amorçage de la décomposition thermique est facile et les réactions se déroulent rapidement.

f(α) ou g(α) est la fonction de conversion ; elle est la fonction du modèle réactionnel. Elle décrit les mécanismes réactionnels qui se produisent au cours du processus de décomposition thermique.

Par ailleurs, du fait de la complexité des réactions chimiques qui se déroulent pendant la décomposition thermique de la biomasse, l'équation (1.4) suppose que certaines hypothèses soient satisfaites. Il faut notamment qu'un seul processus réactionnel contrôle la cinétique et ce, sur l'ensemble de la décomposition thermique. Aussi, comme aucune variable portant sur les gaz n'intervient dans cette équation, l'hypothèse selon laquelle la composition du gaz n'influence pas la décomposition thermique est émise.

De nombreuses méthodes visant à déterminer les paramètres cinétiques de la décomposition thermique en phase condensée ont été développées dans la littérature. Ces méthodes sont généralement regroupées suivant deux approches : l'approche isoconversionnelle (model-free) et l'approche modélistique (model-based).

1.5.1 Approche modélistique

L'approche modélistique consiste à adapter différents modèles de réaction f(α) ou g(α) dans l'équation cinétique puis à calculer les valeurs de l'énergie d'activation et du facteur pré-exponentiel par des analyses de régression. L'enjeu est de choisir la fonction de conversion applicable dans le cas particulier étudié. Une liste importante de fonction de conversion existe dans la littérature, les plus courantes sont résumées dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4. Fonctions de conversion f(α) et g(α) utilisées dans l'approche modélistique [62]

Numéro	Code	g(α)	F(α)	Nom de l'équation
Equations de diffusion				
1	D1	α^2	$1/(2\,\alpha)$	Une dimension (parabolique)
2	D2	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha)+\alpha$	$-1/\ln(1-\alpha)$	Deux dimensions (Valensi–Barrer)
3	D3	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$	$1{,}5(1-\alpha)^{2/3}/[1-(1-\alpha)^{1/3}]$	Trois dimensions (Jander)
4	D4	$[1-2/3\alpha-(1-\alpha)^{2/3}]$	$1{,}5/[(1-\alpha)^{-1/3}-1]$	(Ginstling–Brounshtein)
5	D5	$[1/(1-\alpha)^{1/3}-1]^2$	$1{,}5(1-\alpha)^{4/3}/[1/(1-\alpha)^{1/3}-1]$	(Zhuravlev)
6	D6	$[(1+\alpha)^{1/3}-1]^2$	$1{,}5(1+\alpha)^{2/3}/[(1+\alpha)^{1/3}-1]$	(Anti-Jander)
7	D7	$[1-(1-\alpha)^{1/3})]^2=\log(t)$	$\{1{,}5(1-\alpha)^{2/3}/[1-(1-\alpha)^{1/3}]\}/t$	(Kroger–Ziegler)
8	D8	$[1-(1-\alpha)^{1/2})]^2$	$(1-\alpha)^{1/2}/[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	Deux dimensions (Jander)
9	D9	$[(1+\alpha)^{1/2}-1]^2$	$(1+\alpha)^{1/2}/[(1+\alpha)^{1/2}-1]$	Deux dimensions (Anti-Jander)
10	D10	$[1/(1-\alpha)^{1/3}-1]$	$3(1-\alpha)^{4/3}$	Transfert interfacial
11	D11	$1/(1-\alpha)^{1/3}-1+1/3\ln(1-\alpha)$	$3/[(1-\alpha)^{-4/3}-(1-\alpha)^{-1}]$	Transfert et diffusion
12	D12	$1/5(1-\alpha)^{-5/3}-1/4(1-\alpha)^{-4/3}+1/20$	$3/[(1-\alpha)^{-8/3}-(1-\alpha)^{-7/3}]$	Diffusion bidimensionnelle
Nucléation d'Avrami–Erofeev et croissance				
13	A1	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$	$4(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}$	(Avrami–Erofeev)
14	A2	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$2(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	(Avrami–Erofeev)
15	A3	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	$3(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$	(Avrami–Erofeev)
16	A4	$[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}$	$4/3(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$	(Avrami–Erofeev)
17	A5	$[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$	$1{,}5(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	(Avrami–Erofeev)
Ordre/interface				
18	F0	α	Constante	Ordre zéro
19	F1	$-\ln(1-\alpha)$	$(1-\alpha)$	1er ordre
20	F2	$1/(1-\alpha)-1$	$(1-\alpha)^2$	2nd ordre
21	R2	$[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	$2(1-\alpha)^{1/2}$	Contraction surfacique
22	R3	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]$	$3(1-\alpha)^{2/3}$	Contraction volumique
23	R4	$[1-(1-\alpha)^{2/3}]$	$3/2(1-\alpha)^{1/3}$	Contraction interfaciale
Puissance/exponentiel				
24	P2	$\alpha^{1/2}$	$2\,\alpha^{1/2}$	Loi de puissance (demi)
25	P3	$\alpha^{1/3}$	$3\,\alpha^{2/3}$	Loi de puissance (tiers)
26	P4	$\alpha^{1/4}$	$4\,\alpha^{3/4}$	Loi de puissance (quart)
27	E1	$\ln(\alpha)$	α	Exponentiel

Cette approche a l'avantage de s'appliquer aux réactions compétitives dont les étapes se chevauchent fortement et celles dont le mécanisme change en fonction de la vitesse de chauffe. Cependant, ici, le nombre d'étapes cinétiques se limite au nombre de pics visibles sur les courbes dTG et ne permet pas de suivre l'évolution de l'énergie d'activation et de la constante pré-exponentielle au cours de la décomposition thermique de l'échantillon.

1.5.2 Approche isoconversionnelle

L'approche isoconversionnelle permet de suivre l'évolution de l'énergie d'activation en fonction de l'avancement de la réaction sans au préalable fixer un mécanisme réactionnel. Elle repose sur l'analyse de plusieurs courbes de perte de masse caractérisées par des vitesses de chauffe différentes. Toutes les méthodes isoconversionnelles tirent leur origine du principe d'isoconversion qui stipule que la vitesse de réaction ou taux de conversion thermique n'est fonction que de la température lorsque le degré de conversion α est constant. Cela se perçoit à travers le logarithme dérivatif de l'équation (1.4).

$$\left[\frac{dln(\frac{d\alpha}{dt})}{d(\frac{1}{T})}\right]_{\alpha} = \left[\frac{dln(k(T))}{d(\frac{1}{T})}\right]_{\alpha} + \left[\frac{dln(f(\alpha))}{d(\frac{1}{T})}\right]_{\alpha} \quad (1.10)$$

Puisque $k(T) = A.\exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$ et f(α) est constante (car α=cst) alors l'équation (1.10) devient :

$$\left[\frac{dln(\frac{d\alpha}{dt})}{d(\frac{1}{T})}\right]_{\alpha} = -\frac{E(\alpha)}{R} \quad (1.11)$$

Afin de déterminer l'énergie d'activation E_α, quelques expériences à des vitesses de chauffe différentes (trois à cinq) doivent être réalisées. Les calculs à partir de plusieurs courbes à différentes vitesses de chauffe sont effectués sur la même valeur de α, ce qui permet de déterminer l'énergie d'activation pour chaque valeur de α [8].

- **Avantages**

Cette approche a l'avantage d'être simple et permet d'éviter des erreurs dues au choix d'un modèle réactionnel. Elle ne stipule pas que A et E sont constants au cours du processus ; elle est donc plus précise. De plus cette approche permet d'évaluer la cinétique des réactions complexes en peu de temps. Par ailleurs, elle permet d'estimer l'énergie d'activation E_α à un degré spécifique de conversion α_i pour un modèle indépendant. En répétant cette procédure à différentes valeurs de α, on obtient un profil de l'énergie d'activation en fonction de α_i.

- **Inconvénients**

L'inconvénient majeur de cette approche réside dans le fait qu'une série d'analyses ATG d'un échantillon considéré à différentes vitesses de chauffe (pour le mode dynamique) avec la même masse et le même débit de gaz doit être réalisée ; toute fluctuation peut ainsi entrainer des erreurs sur les paramètres cinétiques calculés [8]. Cette approche ne permet pas de dénombrer les différentes étapes de la réaction, leur contribution au phénomène étudié et l'ordre suivant lequel elles ont lieu.

En outre, selon les résultats des travaux du projet « cinétique » à l'initiative de l'ICTAC (Confédération internationale pour l'analyse thermique et la calorimétrie), l'approche isoconversionnelle utilisant plusieurs vitesses de décomposition thermiques est appropriée pour décrire la cinétique multi-étape [63]. Elle permet de déterminer l'énergie d'activation apparente (E_α) en fonction de α sans aucune hypothèse préalable sur la fonction de conversion qui décrit le mécanisme de réaction.

Pour les présents travaux de thèse, le choix a été fait de ne pas entrer dans les détails des mécanismes de décomposition thermique des biomasses étudiées. Ce choix est justifié par le

nombre très élevé de réactions chimiques complexes mises en jeu. Ainsi, nous utilisons les réactions apparentes qui se situent à une échelle plus grande que celle des réactions élémentaires. Nous suivrons donc l'évolution de l'énergie d'activation et de la constante pré-exponentielle des réactions apparentes en fonction de l'avancement α et de la température. L'approche isoconversionnelle est ainsi la mieux indiquée dans ce cas de figure.

De nombreuses méthodes isoconversionnelles basées sur la forme différentielle ou intégrale de la loi cinétique existent dans la littérature. Les méthodes qui sont utilisées dans les présents travaux sont décrites dans le chapitre 2.

1.6 Densification de la biomasse

La biomasse a de façon générale une faible densité apparente, car elle se trouve en vrac sous sa forme d'origine. Cela pose des problèmes majeurs lors de son utilisation, du stockage et du transport pour un traitement ultérieur. Les densités apparentes les plus faibles se situent autour de 40 $kg.m^{-3}$ pour les biomasses comme la paille en vrac et la bagasse puis les niveaux les plus élevés sont d'environ de 250 $kg.m^{-3}$ pour certains résidus. Densifiées, les densités apparentes de ces biomasses peuvent atteindre 10 fois celles d'origine, ce qui augmente leurs densités énergétiques et les rend favorables à diverses applications [64].

La densification est un procédé qui consiste à compacter des matériaux en des produits dont la densité est plus grande que celle de la matière première de départ [65]. Au cours de la densification de la biomasse, les particules de celle-ci sont pressées dans un volume réduit. Les procédés conventionnels de densification de la biomasse peuvent être classés en quatre groupes : la mise en balles, la pelletisation (ou granulation), l'extrusion et le briquetage. Ces procédés sont généralement réalisés à l'aide d'une presse à balles, d'un granulateur, d'une presse à vis, d'une presse à piston ou d'une presse à rouleaux. La pelletisation et le briquetage sont les deux procédés les plus couramment utilisés pour la densification de la biomasse pour des utilisations comme combustibles solides [66].

1.6.1 Mécanisme de la densification

Le processus de densification de la biomasse se déroule généralement en trois étapes. Dans un premier temps, les particules se rapprochent et se réarrangent pour former une masse compacte. À ce stade, elles conservent la plupart de leurs propriétés intrinsèques ; cependant, de l'énergie est dissipée en raison du frottement inter-particules et particule-paroi. Ensuite, à hautes pressions, les particules sont davantage poussées les unes contre les autres et subissent des déformations plastiques et élastiques, ce qui augmente significativement le contact inter-

particules. Le rapprochement des particules induit des forces de liaison à courte portée comme les forces de van der Waals et les forces électrostatiques. À ce stade, les particules fragiles peuvent se briser, entrainant un verrouillage mécanique. Ce dernier n'implique pas de forces atomiques et contribue très peu à la résistance de la biomasse densifiée. Enfin, la réduction de volume se poursuit jusqu'à ce que la densité du matériau densifié se rapproche des densités réelles de ses composants (Figure 1.9). Si la formation d'un mélange eutectique est favorable, la chaleur générée à un point de contact peut conduire à une fusion locale du matériau. Une fois refroidi, le matériau fondu forme des ponts solides très résistants [67]. Lors de la densification, les conditions spécifiques de pression et de température appliquées à la biomasse, peuvent générer une transition vitreuse de certains composants qui se comportent alors comme des « liants naturels » [68]. C'est notamment le cas de la lignine et des hémicelluloses qui participent à la création des ponts solides. Ces polymères amorphes thermoplastiques peuvent, dans la gamme de température de leur transition vitreuse (de 60 à 90 °C pour la lignine [69]), se ramollir et s'écouler plus facilement. Une fois la biomasse refroidie, ces nouveaux liens sont consolidés.

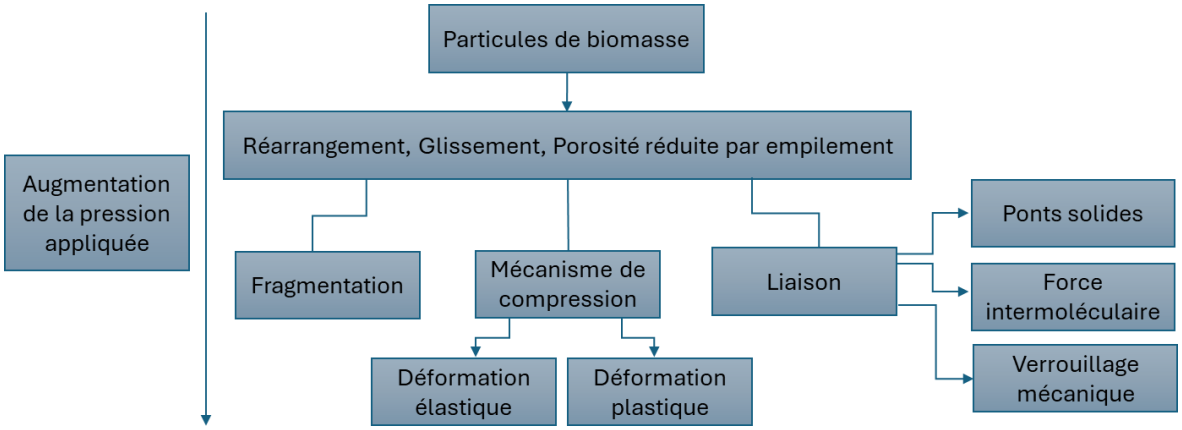


Figure 1.9. Mécanisme de densification de la biomasse [70]

1.6.2 Quelques technologies de densification

En se basant sur le type de technologie utilisée, la densification peut se catégoriser en quatre groupes qui sont : densification à presse à piston (un piston compresse la matière première dans un cylindre), densification à presse à vis (extrusion), densification à presse à rouleau et pelletisation (granulation) [65]. La technologie d'extrusion consiste à presser la matière première par une vis dans une filière pour produire des matériaux compactés généralement sous forme cylindrique ayant un diamètre compris entre 2 et 10 cm. Dans la technique de pelletisation ou granulation, le matériau est pressé à travers des trous cylindriques d'une matrice

par des rouleaux rotatifs. Le frottement entre les particules entraine leur compression à l'intérieur de la filière pour former des granulés dont les diamètres sont compris entre 4,8 et 19 mm et de longueur de 12,7 à 25,4 mm [71]. Les produits des trois premières technologies sont appelés « briquettes » et celui de la dernière est dit « pellette ».

1.6.2.1 Densification par pelletisation (granulation)

La pelletisation est similaire au briquetage, mais elle utilise de plus petites filières d'environ 30 mm pour produire des matériaux densifiés de petites tailles. Une machine à granulés se compose d'une filière (annulaire ou plate) perforée de canaux cylindriques et d'un ou deux rouleaux de compression. La taille des orifices de la filière est prédéterminée avant chaque analyse (Figure 1.10). Selon les installations, la filière ou les rouleaux peuvent être en rotation, et c'est ce mouvement de rotation qui force les particules de biomasse à pénétrer à l'intérieur des canaux de la filière. Un couteau installé sur l'unité coupe les pellettes en fonction des longueurs souhaitées et le produit final est collecté.

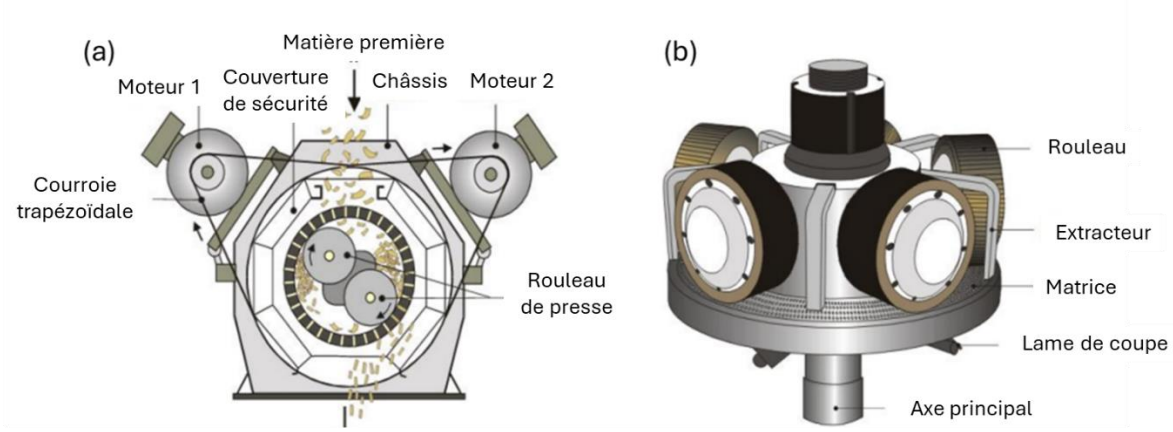


Figure 1.10. Presses à granulés (a) à filière annulaire et (b) à filière plate [72]

1.6.2.2 Densification par extrusion ou compactage avec une presse à vis

La densification par extrusion est un procédé mécanique ou thermomécanique par lequel la biomasse est contrainte de traverser une filière grâce à la force rotative d'une vis sans fin. Au cours du processus, la biomasse se déplace depuis l'orifice d'alimentation à l'aide de la vis rotative, en passant par le canon et la filière, ce qui entraîne un gradient de pression et un important frottement dû au cisaillement de la biomasse. Les effets combinés du frottement des particules avec les parois au niveau du canon, du frottement interne des particules de la biomasse et de la vitesse de rotation de la vis (peu atteindre 600 tr/min) provoquent une augmentation de la température dans le système, ce qui chauffe la biomasse. Cette dernière est

forcée à travers la filière d'extrusion pour former les briquettes avec la forme requise. Si la chaleur générée dans le système n'est pas suffisante pour que le matériau atteigne un état pseudo-plastique, de la chaleur peut être fournie depuis l'extérieur en utilisant des bandes chauffantes [73]. La Figure 1.11 présente le schéma synoptique d'une presse à vis.

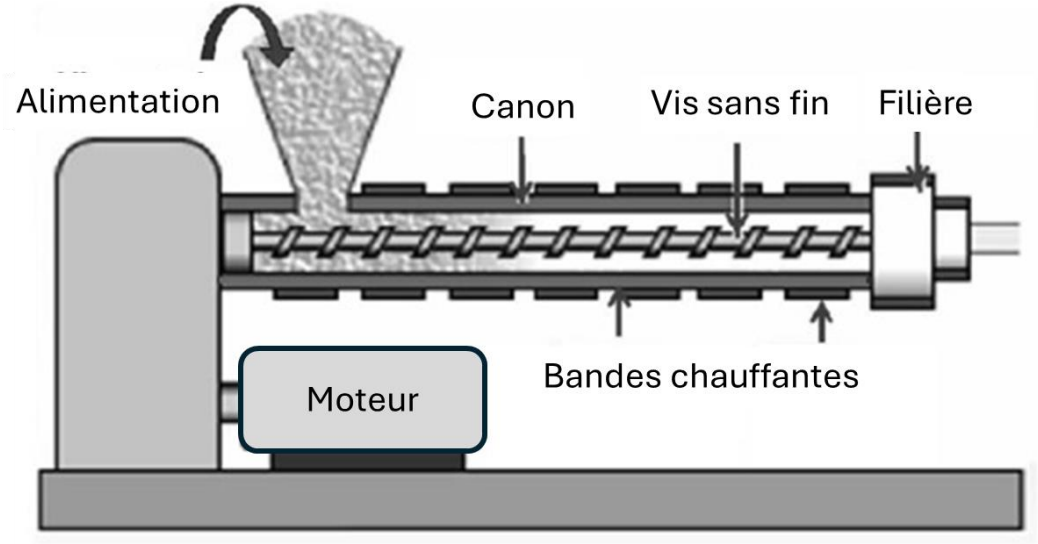


Figure 1.11. Schéma synoptique d'une presse à vis

Les presses à vis ont l'avantage de pouvoir produire des briquettes en continu avec une grande capacité de production. De plus, lorsque la surface extérieure de la briquette est partiellement carbonisée, cela les protège contre l'humidité ambiante et peut faciliter l'allumage et la combustion. Cependant, ces presses requièrent généralement de grandes puissances, donc une consommation électrique élevée. Les pressions de compactage de ces presses sont au préalable fixées par le constructeur ce qui ne permet pas d'évaluer facilement l'influence de ce paramètre sur le processus de densification.

Au Burkina Faso, la technologie à extrusion est la plus utilisée dans les coopératives pour produire des briquettes. Du fait de la non-maîtrise des paramètres de densification, les briquettes qui y sont produites présentent généralement des propriétés mécaniques médiocres. Nous présentons sur la Figure 1.12 une photo d'une presse à extrusion communément rencontrée dans les coopératives.

Figure 1.12. Presse à vis locale

1.6.2.3 Densification par compression hydraulique

La densification de la biomasse par compression hydraulique s'effectue à l'aide d'une presse à piston hydraulique. Le principe des presses hydrauliques est basé sur la théorie de Pascal qui stipule que toute variation de pression produite en un point quelconque d'un fluide incompressible dans un espace confiné est transmis intégralement en tous ses points de sorte que la même variation se produise partout dans ce fluide [74]. Une presse hydraulique utilise donc la pression exercée sur un fluide pour compresser un matériau. Elle est constituée de composants de base utilisés dans un système hydraulique comprenant le cylindre, les pistons, les tuyaux hydrauliques, etc. Le fluide (généralement de l'huile) est versé dans le cylindre de petit diamètre appelé cylindre esclave. Le piston de ce cylindre est poussé de sorte qu'il comprime le fluide qui traverse un tuyau pour atteindre le grand cylindre nommé maître-cylindre, une pression est alors exercée sur ce dernier. La force appliquée sur le fluide par le petit cylindre (F_1) entraîne une force plus grande lorsqu'il est poussé dans le maître-cylindre (F_2). Le principe de fonctionnement d'une presse hydraulique est présenté par la Figure 1.13.

Les presses hydrauliques ont des rendements inférieurs à ceux des presses à extrusion, car le mouvement du cylindre est plus lent que celui des vis sans fin. La capacité de production des presses hydrauliques est généralement comprise entre 40 et 150 $kg.h^{-1}$ [66] ; elles peuvent être manuelles ou automatisées.

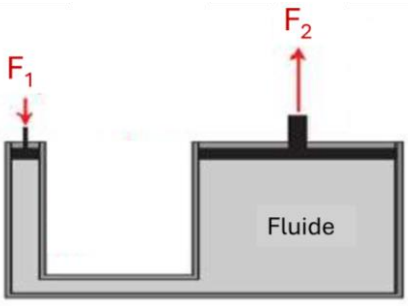


Figure 1.13. Principe de fonctionnement d'une presse hydraulique [74]

Les presses hydrauliques ont l'avantage de pouvoir densifier des biomasses ayant un taux d'humidité supérieur à 15 % et fonctionnent avec une puissance relativement faible par rapport à celle des presses à vis. Ces presses offrent également la possibilité à l'opérateur de contrôler la pression de compactage du matériau au cours du processus de densification.

Ces raisons nous ont conduites à choisir cette technologie pour l'étude de la densification des biomasses soumises à notre étude.

1.6.3 Liants de densification

Les liants sont des composés organiques ou inorganiques généralement additionnés en de faibles quantités à une biomasse à densifier pour améliorer ses propriétés et réduire la demande en énergie pour le compactage. Lorsqu'ils sont utilisés, les liants jouent un rôle clé dans le processus de densification. La résistance, la stabilité thermique, les performances en combustion et le coût des briquettes dépendent également de la qualité du liant de densification utilisé pour les produire [75]. Un bon liant de densification doit être susceptible de former des liaisons fortes avec les particules du matériau à densifier, il ne doit pas avoir d'effet négatif sur la combustibilité et le dégagement de chaleur de la briquette, il ne doit pas polluer l'environnement et il doit être disponible et avoir un faible coût. On distingue les liants organiques, les liants inorganiques et les liants composites ou hybrides [76].

Les liants inorganiques augmentent généralement la teneur en cendre des briquettes et réduisent leur densité énergétique, ce qui rend quelques fois ces dernières incompatibles à certaines utilisations. Cependant, ces liants présentent l'avantage d'être peu coûteux et résistants aux agents biologiques. Les liants inorganiques sont entre autres l'argile, la bentonite, la chaux, etc. Les liants composites ou hybrides sont obtenus par combinaison de deux ou plusieurs liants organiques ou inorganiques. Ces liants peuvent contribuer à réduire le coût de production et à améliorer les propriétés des briquettes.

Les liants utilisés dans la présente étude sont organiques. Ils ont l'avantage d'avoir un faible taux de cendre et ont la capacité de former des liaisons fortes avec les particules du matériau densifié. Ces liants se décomposent facilement à haute température, ils sont généralement moins résistants à l'humidité et aux dégradations biologiques. Les liants organiques sont entre autres l'amidon, la mélasse, la gomme arabique, etc.

1.6.4 Paramètres de densification

Plusieurs paramètres influencent la densification et les propriétés des briquettes qui en découlent. Ces paramètres peuvent concerner les propriétés intrinsèques de la matière première de départ (humidité, taille des particules, composition chimique, etc.) ou les variables du processus de la densification (température, pression de compactage, temps de séjour, etc.) ou la quantité/nature des liants de densification.

Selon Bhattacharya et al. [65], la température joue un rôle majeur dans le processus de densification et influence considérablement les propriétés du produit densifié. Reed et al. [77] ont rapporté que le préchauffage de la matière première à densifier réduit de moitié la pression de compactage nécessaire pour produire des briquettes de bonne qualité. Ils ont d'ailleurs trouvé que la densification de la biomasse réalisée à 225 °C et 250 °C a produit des briquettes dont le pouvoir calorifique supérieur est plus élevé à celui de la biomasse densifiée à des températures inférieures.

Demirbas et Ayse [78] ont observé qu'une augmentation de la pression de compactage des déchets de papier de 300 à 800 MPa avec environ 7 % d'humidité a entrainé l'augmentation de la densité de la biomasse densifiée de 0,182 à 0,325 $g.cm^{-3}$.

Li et Liu [79] ont rapporté que le temps de séjour de la sciure de bois (chêne) dans les moules de densification avait un effet plus important à des pressions plus faibles qu'à des pressions plus élevées. Al-Widyan et al. [80] ont quant à eux montré que des temps de séjour des tourteaux d'olive compris entre 5 et 20 secondes n'ont pas eu d'effet significatif sur la durabilité et la stabilité des briquettes produites.

En outre, plusieurs auteurs ont étudié l'effet de certains composants chimiques de la biomasse sur la densification. Kaliyan et al. [71] ont rapporté que la matière grasse résiduelle des parois cellulaires peut agir comme un élément de liaison entre les particules en formant des ponts qui ont un effet positif sur la dureté et la durabilité des briquettes. La lignine agit comme un liant lors de la densification ; elle se ramollit à des températures élevées renforçant ainsi la cohésion entre les particules. Selon Bradfield et Lévi [81], lorsque la teneur en lignine et des extractives est supérieure à 34 % dans le bois, la durabilité des granulés issus de sa densification diminue. L'eau agit à la fois comme liant et comme lubrifiant en augmentant la surface de contact des particules par un renforcement des forces de Van Der Walls. De nombreuses études ont montré que la dureté et la durabilité des produits densifiés augmentent avec une augmentation de la teneur en eau jusqu'à une valeur optimale. Smith et al. [82] ont rapporté que l'augmentation de

la teneur en humidité de 10 à 15 % augmentait la durabilité des briquettes de paille de blé de 73 à 81 %. Parallèlement à ces résultats, Bello et Onilude [83] ont montré que les briquettes de sciure de bois produites à 12 % de taux d'humidité s'effritaient au bout de 30 jours et avaient une mauvaise stabilité dimensionnelle. Cependant, celles produites avec un taux d'humidité de la biomasse de 8 % avaient de meilleures propriétés physiques.

Dans la présente thèse, une étude simultanée de l'influence de quatre paramètres de densification (pression de compactage, temps de séjour, taux d'humidité et ratio liant/biomasse) sur les propriétés physico-chimiques et thermiques des briquettes sera effectuée et le procédé sera optimisé par utilisation de la méthodologie des plans d'expérience.

1.7 Généralités sur les plans d'expérience

1.7.1 Définitions et principe

La recherche scientifique est un processus qui conduit à la production de connaissances. L'acquisition de ces connaissances se faisant la plupart du temps à travers une expérimentation, il est nécessaire de disposer d'une méthodologie de recherche expérimentale susceptible de rendre ce procédé le plus efficace possible. L'expérimentation est généralement encadrée par deux étapes à savoir, en amont, la planification et en aval l'analyse des données. La planification nécessite impérativement que puisse être établie une relation de cause à effet entre les paramètres du phénomène, dits facteurs, qui sont susceptibles d'influencer le comportement de ce phénomène, et ceux qui caractérisent le résultat de ce dernier (appelés réponses). Le schéma cybernétique de la boîte noire présenté par la Figure 1.14 représente cette situation au sein de laquelle les entrées représentent les facteurs et les résultats sont les réponses.

Figure 1.14. Schéma cybernétique de la boîte noire

Lorsque le phénomène étudié est dépendant de plusieurs facteurs, la méthode intuitive (ou traditionnel) qui consiste généralement à fixer les niveaux de tous les facteurs sauf ceux d'un seul et de mesurer la réponse devient obsolète du fait du nombre gigantesque d'expériences à réaliser et des ressources à mobiliser. Pour résoudre ce genre de problème, il est nécessaire d'adopter une démarche rigoureuse dans la réalisation des expériences. La méthodologie des plans d'expériences repose sur une approche statistique de planification d'expériences. La différence principale avec la méthode intuitive vient du fait qu'elle permet de faire varier tous les niveaux à la fois à chaque expérience et à apprécier l'effet de leurs variations sur la réponse. Ainsi, cette méthode conduit à un maximum d'informations et de précisions en un minimum d'expériences. Le principe de la méthode consiste à ne pas étudier tous les points expérimentaux possibles, mais seulement certains points choisis pour leur propriété d'orthogonalité.

1.7.2 Notion de facteur (Xi)

Les facteurs sont les paramètres supposés influencer le comportement du phénomène étudié. Ils peuvent être quantitatifs lorsqu'ils sont naturellement exprimés à l'aide de valeurs numériques (pression, température, pH, etc.) ou qualitatifs dans le cas contraire (couleur, type de matériau, etc.). Il existe deux types de facteurs : les facteurs contrôlés et les facteurs non contrôlés. Les facteurs contrôlés sont des facteurs pour lesquels on peut imposer des valeurs qui sont les niveaux de variation. Les facteurs non contrôlés peuvent être connus, mais ne sont pas contrôlables, ou alors peuvent être inconnus, mais influencent également le phénomène. Le niveau correspond à la valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai donné. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur s'appelle le domaine de variation du facteur.

1.7.3 Notion de réponse (Y)

La réponse Y correspond à la grandeur qui est observée pour chaque expérience réalisée ; c'est la grandeur d'intérêt, le résultat de l'expérience. Elle est le paramètre de sortie du système et doit être représentative puis le moins dispersé possible pour des variables d'entrées constantes. La réponse Y peut être exprimée sous la forme $Y = f(X_1, X_2, X_3, \ldots, X_n)$ où f est la relation fonctionnelle qui lie la réponse aux n facteurs $X_1, X_2, X_3, \ldots, X_n$.

1.7.4 Domaine expérimental et plan d'expérimentation

Le domaine expérimental délimite la zone d'étude ou de variation des facteurs. Le plan d'expérimentation correspond à l'ensemble des conditions expérimentales imposées aux facteurs. La structure mathématique formelle dont le plan d'expérimentation est une application dans le monde réel est appelée matrice d'expériences.

Il existe plusieurs méthodes de plans d'expériences : le plan factoriel complet (PFC), le plan factoriel fractionné (PFF), le plan central composite (PCC), le plan dit de PLACKETT-BURMAN ou plan d'HADAMARD, etc.

1.7.5 Principaux avantages de la méthodologie des plans d'expériences

Les principaux avantages de l'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences sont :

- Diminution du nombre d'expériences sans pour autant perdre la qualité des résultats ;
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs et de les faire varier à la fois ;
- Possibilité d'étudier les interactions entre les facteurs ;
- Modélisation des phénomènes étudiés ;
- Réduction des ressources à mobiliser pour avoir des résultats de bonne qualité.

En outre, le nombre d'essais d'un plan d'expériences pour l'optimisation d'un phénomène peut croître rapidement en fonction du nombre de facteurs. Ainsi, pour qu'il constitue une stratégie efficace et économique, il convient de faire un criblage des facteurs à partir des plans de criblage, sauf si les paramètres les plus influents du phénomène à optimiser sont bien connus.

1.7.6 Optimisation par les plans de surfaces de réponse

L'optimisation consiste à trouver les conditions expérimentales qui correspondent à un optimum, c'est-à-dire un maximum ou un minimum de la réponse étudiée. Elle doit permettre d'affirmer, avec un risque d'erreur raisonnable, qu'il n'existe pas d'autres conditions conduisant à une meilleure valeur de la réponse dans le domaine expérimental considéré.

Les plans de surfaces de réponse s'appliquent aux variables continues et utilisent des modèles polynomiaux de second degré pour traduire la dépendance des réponses en fonctions des facteurs. Ces plans peuvent utiliser des modèles d'ajustement de 1er ordre, de second ordre ou d'ordre supérieur [84]. Pour k facteurs, le modèle typique pour les plans de surface de réponses s'écrit comme suit :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 \qquad (1.12)$$

Où :

Y : réponse étudiée ;

β_0 : Moyenne des coefficients ;

β_i : Coefficient d'un terme linéaire ;

β_{ij} : Coefficient d'un terme d'interaction ;

β_{ii} : Coefficient d'un terme quadratique ;

X_i et X_j : Valeurs codées des facteurs i et j respectivement.

Il existe plusieurs types de plans de surfaces de réponses, mais les plus communément utilisés sont le plan composite centré et le plan Box-Behnken [84].

1.7.6.1 Plan composite centré

Le plan composite centré (CCD en Anglais) est l'un des plans de surfaces de réponse les plus couramment utilisés. Il a été introduit par Box et Wilson en 1951 et est une forme étendue du plan factoriel complet à trois niveaux avec des points en étoiles dits points axiaux. Il est généralement utilisé lorsque le plan factoriel détecte une courbure dans les données. Dans ce contexte, le plan composite centré étend le plan factoriel en ajoutant des points centraux et des points étoiles, ce qui permet d'estimer cet effet de courbure [85]. Ce plan est composé de trois parties (d'où le qualificatif « composite ») :

- La première partie est un plan factoriel complet à deux niveaux notés -1 et +1. Elle comprend 2^n points (n représentant le nombre de facteurs) et ces derniers jouent un rôle important dans l'estimation des effets principaux, des effets d'interaction linéaire et des effets quadratiques ;
- La seconde partie est constituée des points centraux. Ils sont représentés par le niveau « 0 » et leur nombre total varie généralement de 3 à 5 ;
- La troisième partie est constituée des points axiaux ou en étoiles représentés par -α et +α. Cette partie comprend 2n points axiaux, où n est le nombre de facteurs.

Dans un plan composite centré, chaque facteur comprend 5 niveaux à savoir : -α, +α, -1, 0, et +1. Le nombre d'expériences est donné par la relation :

$$N = 2^n + 2n + C_0 \qquad (1.13)$$

Où :

N : le nombre d'expériences du plan composite centré ;

n : le nombre de facteurs ;

C_0 : Le nombre de points au centre

1.7.6.2 Plan Box-Behnken

Le plan Box-Behnken (BBD) est un plan de surfaces de réponse largement utilisé et qui est particulièrement utile pour établir des relations de cause à effet entre les facteurs et les réponses

d'un phénomène. Il a été développé par George E. P. Box et Donald Behnken en 1960. Le plan Box-Behnken est qualifié d'indépendant dans le sens où il ne contient pas de plan factoriel ou de plan factoriel fractionnaire intégré. Ici, les facteurs prennent trois niveaux à savoir -1, 0 et +1 et les points au centre sont codés par « 0 ». Pour trois facteurs, la représentation graphique est un cube constitué d'un centre et de points au milieu des arêtes comme le montre la Figure 1.15.

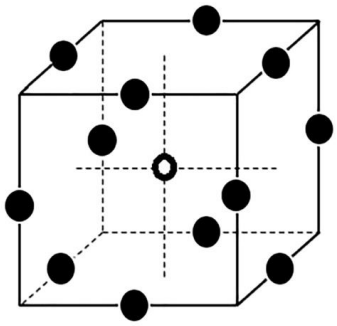


Figure 1.15. Plan Box-Behnken pour trois facteurs

Le nombre d'expériences d'un plan Box-Behnken est déterminé par l'expression :

$$N = 2n(n-1) + C_0 \qquad (1.14)$$

Où :

N : nombre d'expériences du plan Box-Behnken

n : nombre de facteurs

C_0 : nombre de points au centre

L'un des avantages du plan Box-Behnken est qu'il ne contient pas de combinaisons dans lesquelles tous les facteurs sont aux niveaux les plus élevés ou les plus bas en même temps (sommets des cubes), ce qui évite la plupart des cas d'effectuer des mesures dans des conditions extrêmes. Contrairement au plan composite centré, le plan Box-Behnken qui ne comporte pas de points en étoiles est favorable à la formulation des biocombustibles briquettes avec des niveaux de facteurs « 0 ». Il est ainsi le mieux adapté aux objectifs et données de ces travaux de recherche.

1.8 Analyse critique et formulation des questions de recherche

L'identification du potentiel énergétique d'une biomasse, la compréhension de ses caractéristiques et la maîtrise des diverses phases de sa décomposition thermique sont indispensables pour sa valorisation énergétique. Musah et al. [86] ont effectué la caractérisation de trois échantillons de tourteaux de karité provenant de l'Etat du Niger au Nigéria. Les résultats

ont indiqué des niveaux de matière grasse résiduelle inférieurs à 2 %, des concentrations en azote variant de 5 à 8 % et des pouvoirs calorifiques inférieurs voisines de 23 $MJ.kg^{-1}$ [86]. Darvell et al. [87] ont, d'une part, analysé la pyrolyse des résidus de karité contenant 1,22 % de matière grasse résiduelle, et d'autre part, défini les paramètres cinétiques conformément au modèle d'ordre 1. Les courbes dTG des résidus ont montré un chevauchement de la phase de décomposition thermique de la matière grasse avec celle de la fraction lignocellulosique. Ils en ont conclu que les paramètres cinétiques seraient probablement surestimés [87]. Selon Munir et al. [88], les tourteaux de karité présentent une plus grande réactivité sous environnement oxydant que sous atmosphère inerte. L'énergie d'activation des tourteaux, dont la composition en matières grasses n'a pas été spécifiée, a connu une augmentation de 67 $kJ.mol^{-1}$ pour la pyrolyse à 108 $kJ.mol^{-1}$ pour la combustion. L'impact des substances extractibles sur le comportement thermique des résidus de presse provenant de la région de Bobo-Dioulasso a été investigué par Melzer et al. [89]. Les résultats ont révélé une dégradation quasi totale des triglycérides lors du processus de pyrolyse. En outre, il a été montré que la présence des extractibles influence le comportement thermique des résidus [11]. Abubakar et al. [90] ont mené une étude sur la densification des tourteaux de karité produits au Nigeria, en appliquant une pression de 8 MPa et en utilisant l'amidon comme liant dans un ratio de 5:1 (tourteaux de karité : liant). Leur travail a permis de déterminer la résistance à la compression ainsi que les propriétés physico-chimiques des briquettes obtenues, telles que leur durabilité, leur capacité calorifique et leur taux d'humidité [90]. Bien que les briquettes aient été produites, les effets des paramètres de densification sur les propriétés finales de ces dernières n'ont pas été étudiés de manière approfondie. Ces paramètres peuvent influencer de manière significative la qualité des briquettes en termes de résistance à la compression, de durabilité, de pouvoir calorifique et de taux d'émission de polluants lors de leur combustion.

Au Burkina Faso, ainsi que dans de nombreux autres pays de la région ouest africaine, les résidus de transformation des amandes de karité sont généralement obtenus par barattage ou pressage mécanique. Cette différence dans le traitement des amandes de karité pourrait avoir un impact sur le potentiel énergétique, le comportement thermique et la densification des résidus générés.

Ainsi, les trois questions de recherche suivantes se posent :

- La technique d'obtention du beurre à partir des amandes de karité a-t-elle un impact sur les caractéristiques physico-chimiques et thermochimiques des résidus générés ?

- Les caractéristiques physico-chimiques des résidus issus des diverses techniques d'extraction du beurre de karité ont-elles un impact sur les conditions de leur compactage en biocombustibles briquettes ?
- Quelle est la composition des gaz résultant de la combustion des résidus bruts et des biocombustibles briquettes produites ?

Les questions ci-dessus soulèvent l'importance de poursuivre les recherches afin de mieux comprendre comment la décomposition thermique et les variables de densification affectent les propriétés des biocombustibles briquettes et comment optimiser les conditions de production pour garantir des briquettes de hautes qualités adaptées à la production d'énergie durable. Une modélisation à partir des résultats des analyses thermogravimétriques sera réalisée afin de déterminer le modèle cinétique le mieux adapté à la détermination des énergies d'activation et des constantes pré-exponentielles de la décomposition thermique des résidus de barattage et de pressage mécanique. Ensuite, des paramètres clés susceptibles d'influencer la densification de ces résidus seront déterminés et optimisés à partir de la méthodologie de surface de réponse (MSR). Ainsi, les effets de quatre variables indépendantes, à savoir la pression de compactage, le taux d'humidité, le ratio liant/biomasse et le temps de séjour seront simultanément étudiés sur quatre variables dépendantes, c'est-à dire la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique. De plus, l'influence de la matière grasse résiduelle, la taille des particules et du type de liant sur ces quatre variables dépendantes sera également étudiée. Enfin, les émissions (CO_2, CO, HC et NOx) liées à la combustion des résidus et des briquettes optimisées seront évaluées et une étude financière sera réalisée.

Chapitre 2 :

Etude de la réactivité thermochimique des résidus de transformation des amandes de karité

Chapitre 2 : Etude de la réactivité thermochimique des résidus de transformation des amandes de karité

Introduction

Les résidus de transformation des amandes de karité constituent une biomasse abondante, facilement accessible, mais très peu valorisés au Burkina Faso et dans la plupart des autres pays de l'Afrique de l'Ouest. Ces résidus peuvent avoir des caractéristiques et des comportements thermiques différents du fait qu'ils sont issus de traitements différents des amandes de karité : le barattage et le pressage mécanique. En effet, le barattage fait intervenir une étape de mouture des amandes concassées et plusieurs lavages à l'eau tandis que le pressage mécanique est basé sur le pressage des amandes concassées. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de réaliser une étude comparative du comportement thermochimique des résidus issus des deux principales méthodes de traitement des amandes de karité. Cette comparaison est effectuée en milieux inerte (pyrolyse) et oxydant (combustion), afin d'évaluer leur potentiel de valorisation énergétique. L'analyse en atmosphère inerte permet de simuler les conditions de transformation en biocarburants solides ou en gaz de pyrolyse, tandis que l'étude en milieu oxydant permet d'apprécier leur aptitude à la combustion directe, notamment pour la production de chaleur. Cette approche vise à mieux comprendre les caractéristiques thermochimiques propres à chaque type de résidu en vue d'optimiser leur usage dans des systèmes énergétiques appropriés.

La première section est consacrée à la caractérisation des biomasses étudiées. Six échantillons issus du barattage et du pressage mécanique des amandes de karité ont été prélevés à cet effet. Les analyses physico-chimiques et minérales, la quantification des macromolécules, la détermination des pouvoirs calorifiques supérieurs et la détermination des groupements fonctionnels par spectroscopie IRTF seront effectuées.

La seconde section porte sur l'étude de la réactivité thermochimique de ces biomasses. Ainsi, les phases de décomposition thermique de la pyrolyse et de la combustion de ces résidus seront d'abord déterminées à travers des analyses thermogravimétriques (ATG). Ensuite, l'étude cinétique conduira à la détermination de l'énergie d'activation (E_a) et du facteur pré-exponentiel (A) du processus de combustion en fonction du degré de conversion. À cet effet, les méthodes de Friedman, Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) et de Vyazovkin seront utilisées. Pour finir, les paramètres thermodynamiques, à savoir l'enthalpie (ΔH), l'énergie libre de Gibbs (ΔG) et l'entropie (ΔS) de la combustion des biomasses étudiées seront déterminés.

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Présentation des biomasses sélectionnées

Les échantillons de biomasses utilisés sont des résidus de transformation des amandes de karité. Ces résidus ont été obtenus à partir des deux techniques de transformation des amandes de karité les plus répandues dans toute l'Afrique subsaharienne, à savoir le barattage et le pressage mécanique. Ces deux techniques sont décrites par la Figure 2.1. Les résidus issus de la technique de barattage sont appelés « boues de barattage » et ceux obtenus à partir du pressage mécanique sont dits « tourteaux de presse » [5].

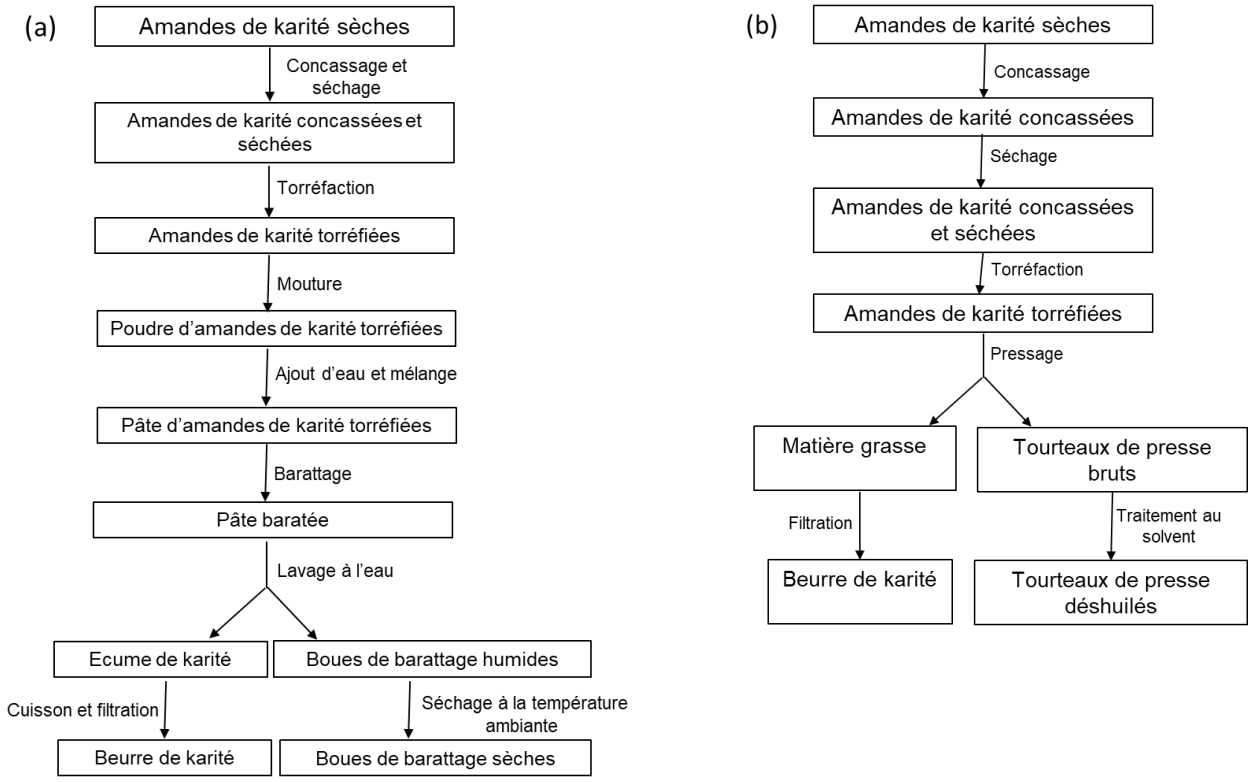


Figure 2.1. Description des techniques de (a) barattage et de (b) pressage mécanique des amandes de karité [5]

Six échantillons de biomasse ont été collectés dans trois différentes villes du Burkina Faso à savoir Ouagadougou, Bobo-Dioulasso et Toussiana. Ces villes sont présentées par la carte de la Figure 2.2.

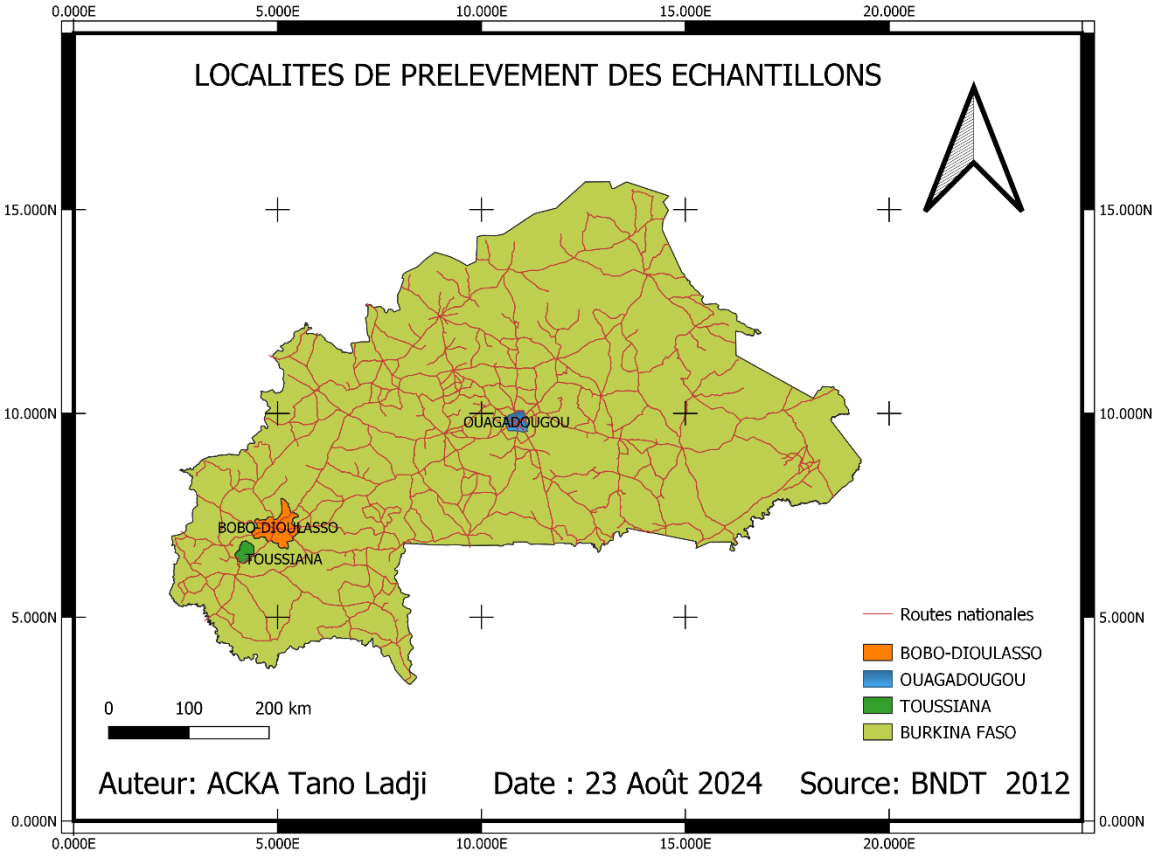


Figure 2.2. Localités de prélèvement des échantillons de biomasse

2.1.1.1 Collecte des boues de barattage

Trois échantillons de boues de barattage ont été prélevés dans trois différentes coopératives de transformation d'amandes de karité situées à Ouagadougou. L'échantillon fourni par l'Association Burkinabé Action Solidarité Femmes/Enfants (ABASF/E) est noté BBa ; ceux issus des coopératives ''Union des Sociétés Coopératives Beogo Neeré (USBN)'' et ''Association Songtaab Yalgré (ASY)'' sont respectivement notés BBu et BBs. Ces trois échantillons sont présentés sur la Figure 2.3.

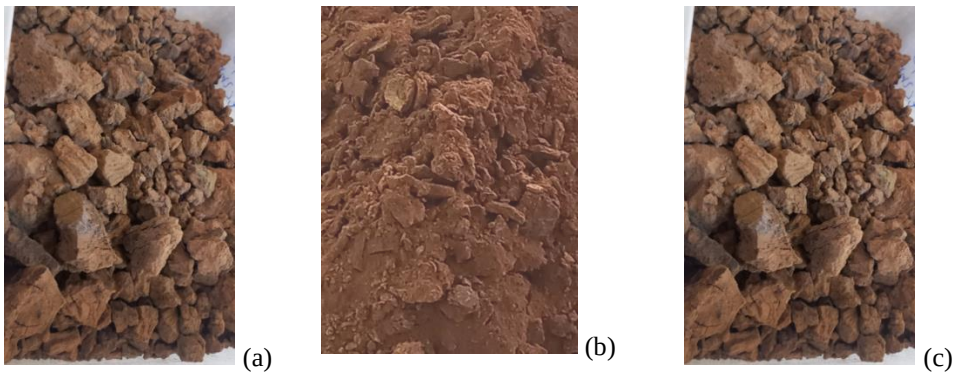


Figure 2.3. Boues de barattage (a) BBa, (b) BBu et (c) BBs

2.1.1.2 Collecte des tourteaux de presse

Trois échantillons de tourteaux de presse dont un échantillon de tourteaux de presse déshuilés ont été prélevés au sud-ouest du Burkina Faso. Deux des trois échantillons ont été fournis par l'usine OLVEA Burkina Faso située à Bobo-Dioulasso. Cette usine qui produit du beurre de karité à l'échelle industrielle génère deux types de résidus : des tourteaux de presse (TPo) et des tourteaux de presse déshuilés (TPo.d). L'autre échantillon de tourteaux de presse (TPs) a été fourni par la Société Toussiana Karité Cosmétiques et Comestibles (SOTOKACC) située à Toussiana. Cette structure produit quant à elle du beurre de karité à l'échelle semi-industrielle. Les trois échantillons de tourteaux de presse sont présentés sur la Figure 2.4.

(a)

(b)

(c)

Figure 2.4. Tourteaux de presse (a) TPo, (b) (TPs) et (c) tourteaux de presse déshuilés (TPo.d)

Tous les échantillons tels que reçus, ont été broyés, tamisés et stockés dans des sacs hermétiques pour les analyses futures.

2.1.2 Propriétés physico-chimiques

2.1.2.1 Analyse immédiate

L'analyse immédiate a consisté en la détermination des taux d'humidité, de matières volatiles, de cendre et de carbone fixe.

- **Taux d'humidité**

Le taux d'humidité représente la teneur en eau, il a été déterminé suivant la norme NF EN ISO 18134. L'analyse a consisté à sécher dans une étuve réglée à la température de 105 °C ± 2 °C, une masse d'échantillon d'environ 2 g (pesée dans un cristallisoir) préalablement broyée et tamisée (Φ < 1 mm). Cette température a été maintenue jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La teneur en eau a ainsi été calculée à partir de la perte de masse de l'échantillon suivant l'équation (2.1).

$$W_b = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \qquad (2.1)$$

Où :

W_b : Taux d'humidité, en (%)

m_1 : Masse du cristallisoir vide, en (g)

m_2 : Masse du cristallisoir avec l'échantillon avant séchage, en (g)

m_3 : Masse du cristallisoir avec l'échantillon après séchage, en (g)

- **Taux de matières volatiles**

Les matières volatiles représentent la fraction d'espèces gazeuses qui s'échappe d'un combustible lorsque celui-ci est soumis à une haute température dans un environnement pauvre en oxygène. Le taux de matières volatiles mesure la facilité avec laquelle une biomasse peut s'enflammer et se gazéifier. Il a été déterminé suivant la norme NF EN ISO 18123. Environ 1 g d'échantillon anhydre a été pesé dans un creuset vide muni de son couvercle et l'ensemble a été placé dans un four à moufle à la température de 900 °C pendant 7 minutes. Le taux de matières volatiles sur base sèche représente le rapport massique entre la quantité de matières dévolatilisées et la prise d'essai initiale. Après refroidissement dans un dessiccateur, il a été calculé à partir de l'équation (2.2) :

$$V_s = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \qquad (2.2)$$

Où :

V_s : Taux de matière volatile sur base sèche, en (%)

m_1 : Masse du creuset vide avec son couvercle, en (g)

m_2 : Masse du creuset avec son couvercle et l'échantillon anhydre, en (g)

m_3 : Masse du creuset avec son couvercle et le résidu carboné, en (g)

- **Taux de cendre**

La cendre représente la partie inorganique d'un combustible ; elle est produite à l'issue de la combustion complète de ce dernier. La cendre inhibe l'efficacité des combustibles en réduisant leurs pouvoirs calorifiques et leurs rendements énergétiques. Le taux de cendre des biomasses de cette étude a été déterminé suivant la norme NF EN ISO 18122. Environ 1 g d'échantillon anhydre a été pesé dans un creuset et l'ensemble a été introduit dans un four à moufle. Un régime de température en quatre phases a ensuite été appliqué :

Phase 1 : température du four à moufle portée à 250 °C pendant 60 minutes ;

Phase 2 : de 250 °C à 550 °C pendant 60 minutes ;

Phase 3 : de 550 °C à 815 °C pendant 60 minutes ;

Phase 4 : la température du four à moufle a été maintenue à 815 °C pendant encore 60 minutes.

Le taux de cendre sur base sèche a été calculé à partir de l'équation (2.3) :

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \qquad (2.3)$$

Où :

A : Taux de cendre sur base sèche, en (%)

m_1 : Masse du creuset vide, en (g)

m_2 : Masse du creuset avec l'échantillon anhydre, en(g)

m_3 : Masse du creuset avec la cendre, en (g)

- **Taux de carbone fixe**

Le carbone fixe sur base sèche est le carbone restant après élimination des matières volatiles et des cendres du biocombustible anhydre. Sa valeur est déterminée par différence suivant l'équation (2.4) :

$$CF = 100 - (A + V_s) \qquad (2.4)$$

Où :

CF : Taux de carbone fixe sur base sèche, en (%)

A : Taux de cendre sur base sèche, en (%)

A_s : Taux de matière volatile sur base sèche, en (%)

2.1.2.2 Analyse ultime

L'analyse ultime a consisté en la détermination des teneurs massiques en éléments carbone (C), hydrogène (H), azote (N), oxygène (O), soufre (S) et chlore (Cl) sur base sèche. C, H et N ont été quantifiés suivant la norme NF EN ISO 16948. Les teneurs en soufre et en chlore ont été déterminées par minéralisation pour dosage halogènes et/ soufre à partir de la norme ISO 334 : 2020. La teneur en oxygène a été déterminée par différence à partir de l'équation (2.5) :

$$\%\ O = 100 - (\%\ C + \%\ H + \%\ N + \%\ S + A) \qquad (2.5)$$

2.1.2.3 Analyse des éléments inorganiques

L'analyse minérale pour la quantification des éléments Al, Ca, Fe, Mg, P, K et Na des différentes biomasses a été réalisée par spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif (ICP-AES) suivant la méthode NF EN ISO 16967 : 2015. La teneur totale en Si sous forme de SiO_2 a également été détectée par ICP-AES. Les teneurs en B, Cu, Zn et Mn ont été quantifiées par spectrométrie de masse par plasma à couplage inductif (ICP-MS).

2.1.2.4 Quantification de la matière grasse résiduelle

Les biomasses de la présente étude sont des résidus issus de la fabrication du beurre de karité. Elles contiennent en général des quantités non négligeables de matière grasse. La matière grasse est une extractible soluble dans les solvants apolaires tels que le n-hexane. La détermination de la teneur en matière grasse résiduelle des biomasses a été réalisée par la méthode de soxhlet en utilisant le n-hexane comme solvant d'extraction dont le dispositif expérimental est présenté par la Figure 2.5 (a). Une prise d'essai de 5 g a été prélevée dans une cartouche d'extraction puis bouchée avec du coton hydrophile. L'ensemble a ensuite été introduit dans un soxhlet et 300 ml de n-hexane ont été transférés dans un ballon à fond rond de 500 ml. Le montage réfrigérant-soxhlet-ballon a ensuite été effectué et l'extraction a été effectuée pendant huit heures. Après refroidissement, la matière grasse a été séparée du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif (Figure 2.5 (b)) réglé à la température de 45 °C. Enfin, le ballon contenant l'extrait a été placé à l'étuve à 105 °C ± 2 °C pendant 30 minutes et pesé après refroidissement dans un dessiccateur.

Le taux de matière grasse résiduelle sur base brute a été déterminé à partir de l'équation (2.6) :

$$T_{Hb} = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100 \qquad (2.6)$$

Où :

T_{Hb} : Taux de matière grasse sur base brute, en (%)

m_0 : Masse initiale de l'échantillon, en (g)

m_1 : Masse du ballon vide, en (g)

m_2 : Masse ballon + matière grasse extraite, en (g)

(a)

(b)

Figure 2.5: (a) Dispositif d'extraction de la matière grasse résiduelle au soxhlet et (b) Evaporateur rotatif

2.1.2.5 Quantification des macromolécules

La quantification des macromolécules des biomasses étudiées a consisté en la détermination des teneurs en cellulose, hémicellulose et lignine. En prélude à cette analyse, les échantillons ont été déshuilés (extraction de la matière grasse résiduelle) par usage du n-hexane comme solvant d'extraction (voir paragraphe précédent). Ensuite, les extractibles solubles dans l'eau et l'acétone ont été extraits afin d'éviter toute interférence avec les étapes d'analyse ultérieures. Les teneurs en hémicellulose et en lignine ont été déterminées à partir de la procédure proposée par Li et al. [91] telle que décrite ci-dessous. Les différentes quantifications ont été répétées deux fois. Enfin, la teneur en cellulose a été calculée par différence.

- **Teneur en hémicellulose**

Un volume de 150 ml d'une solution aqueuse de NaOH de concentration massique 20 $g.l^{-1}$ a été mélangé à 1 g du résidu obtenu après élimination des extractibles et préalablement pesé dans un ballon. L'ensemble a été porté à ébullition sous reflux pendant 3,5 heures et la solution obtenue a été filtrée sur Büchner. Les résidus ont ensuite été lavés 4 fois sur un entonnoir filtrant avec 150 ml d'eau distillée pour éliminer les ions Na^+. Ils ont enfin été séchés dans une étuve à 105 °C et refroidis à la température ambiante dans un dessiccateur avant d'être pesés. La quantité d'hémicellulose et a été calculée à partir de l'équation (2.7) :

$$H_x = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times (100 - E_x) \quad (2.7)$$

Où :

H_x : Teneur en hémicellulose, en (%)

E_x : Teneur en extractibles, en (%)

m_2 : Masse après extraction des extractibles, en (g)

m_3 : Masse finale, en (g)

❖ **Teneur en lignine**

Un volume de 30 ml d'une solution de H_2SO_4 à 72 % a été mélangé à 1 g du résidu obtenu après élimination des extractibles et préalablement pesé dans un ballon. Le mélange ainsi obtenu a été conservé au réfrigérateur à une température d'environ 10 °C pendant 24 h. Ensuite, le mélange a été dilué avec 300 ml d'eau distillée et l'ensemble a été porté à ébullition sous reflux pendant 1 h. La solution finale obtenue a été filtrée sur Büchner et le résidu, lavé 3 fois sur un entonnoir filtrant avec 150 ml d'eau distillée pour éliminer les ions SO_4^{2-}. Après séchage et refroidissement, la teneur en lignine a été déterminée suivant l'équation (2.8) :

$$L_x = \frac{m_4}{m_5} \times (100 - E_x) \quad (2.8)$$

Où :

L_x : Teneur en lignine, en (%)

E_x : Teneur en extractibles, en (%)

m_4 : Masse après extraction des extractibles, en (g)

m_5 : Masse finale, en (g)

❖ **Teneur en cellulose**

La teneur en cellulose a été calculée par différence à partir de l'équation (2.9) :

$$C_x = 100 - (E_x + H_x + L_x) \quad (2.9)$$

2.1.2.6 Détermination du pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible correspond à la quantité de chaleur dégagée par une unité de masse de ce dernier lors de sa combustion complète. La méthode a consisté en la détermination de la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète des différents

échantillons par usage d'un calorimètre adiabatique (Parr Instruments 1241). Une prise d'essai d'environ 1 g a été prélevée dans une coupelle puis introduite dans une bombe calorimétrique préalablement chargée en oxygène. L'ensemble a ensuite été placé dans une vase calorimétrique contenant deux litres d'eau distillée. La quantité de chaleur dégagée lors de la combustion complète de l'échantillon a entrainé une élévation de la température de l'eau contenue dans la vase calorimétrique, ce qui a permis d'estimer le pouvoir calorifique supérieur (PCS) à travers l'équation (2.10) :

$$PCS_{brut} = \frac{K_1.E_{cal}.(T_m - T_i) - K_1.E_{Pt}.(L_i - L_f)}{m_{éch}} \qquad (2.10)$$

Où :

K_1 : Facteur de conversion des calories en joules, K_1= 4,1855 J/cal

E_{cal} : Équivalent calorimétrique du calorimètre, la bombe calorimétrique, les accessoires et l'eau introduite dans la bombe, E_{cal}= 2559 cal/°C

T_m : Température maximale atteinte par le thermomètre de la cuve, en (°C)

T_i : Température initiale, en (°C)

E_{Pt} : Pouvoir calorifique du fil de platine, E_{Pt} = 2,3 cal/cm

L_i : Longueur initiale du fil de platine, en (cm)

L_f : Longueur finale du fil de platine, en (cm)

$m_{éch}$: Masse d'échantillon pesée, en (g)

2.1.2.7 Densité apparente en vrac des biomasses

La densité apparente en vrac d'une biomasse fait référence au rapport d'une fraction de particules de cette biomasse à son volume apparent. Le volume apparent comprenant le volume des particules, celui des vides inter-particules et celui des pores. L'échantillon à analyser a été introduit dans un récipient cylindrique de volume 1 dm^3 depuis une hauteur fixe. Le récipient a ensuite été rempli de sorte à occuper la totalité de son volume et toute particule excédentaire au-delà de la limite supérieure a été éliminée. Le récipient rempli d'échantillon a finalement été pesé et la densité apparente en vrac a été calculée à partir de l'équation (2.11) :

$$Densité\ apparente = \frac{m_{rv} - m_{rp}}{V_r} \qquad (2.11)$$

Où :

m_{rv} : la masse du récipient vide, en (g)

m_{rp} : la masse du récipient rempli d'échantillon, en (g)

V_r : le volume du récipient (10^{-3} m^3)

2.1.2.8 Analyse granulométrique

Les échantillons de boues de barattage et de tourteaux de presse ont été broyés à l'aide d'un broyeur à couteau de marque SM 100 Retsch muni d'un tamis de maille Φ = 2 mm. L'étude granulométrique de ces échantillons a ensuite été effectuée par la méthode de tamisage suivant la norme NF P 18-560. Une masse initiale d'environ 500 g de chaque échantillon a été prélevée puis versée dans la colonne de tamisage constituée de 15 tamis de mailles Φ comprises entre 2 et 0,063 mm. L'ensemble tamis-échantillon a été agité jusqu'à ce qu'il ne passe pratiquement plus de matière pouvant modifier significativement le résultat. Les différents refus partiels et cumulés ont enfin été pesés à 1 g près. Pour chaque tamis, le pourcentage de refus cumulé a été calculé à partir de l'équation suivante :

$$\%\ Refus\ cumulé = \frac{M_{rci}}{M_i} \times 100 \qquad (2.12)$$

Où :

M_{rci} : Masse du refus cumulé du tamis i, en (g)

M_i : Masse initiale d'échantillon (500 g)

2.1.2.9 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF ou FTIR en Anglais) est une technique analytique non destructrice dont le principe est basé sur l'envoi par l'appareil, d'un rayonnement IR sur l'échantillon analysé. Les molécules de ce dernier absorbent une partie de ce rayonnement émis et la transforment en énergie de rotation et/ou de vibration. Le détecteur recueille ainsi le signal qui se présente sous forme d'un spectre de nombre d'onde compris entre 4000 et 400 cm^{-1} dans la présente étude. Les spectres d'absorption infrarouge des boues de barattage et des tourteaux de presse ont été obtenus à travers cette technique analytique. L'étude de ces spectres a conduit à la détermination des groupements fonctionnels des différentes biomasses. L'appareil IRTF ALPHA II de marque Bruker (Figure 2.6) a été utilisé pour analyser les échantillons préalablement broyés.

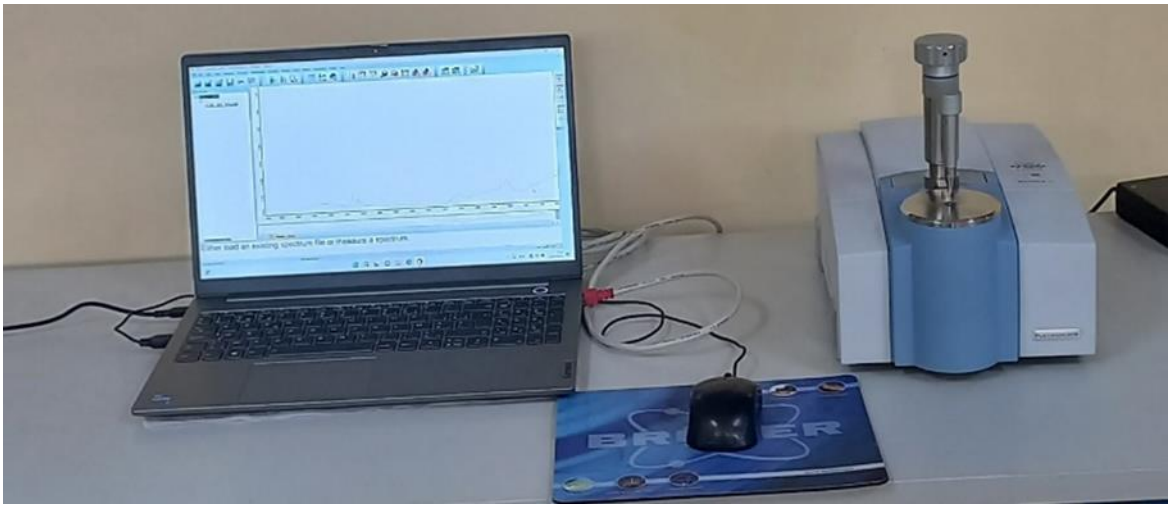


Figure 2.6. Spectromètre IRTF ALPHA II, Bruker

2.1.3 Réactivité thermochimique

Le terme « analyse thermique (TA) » est fréquemment utilisé pour décrire les techniques analytiques qui permettent d'étudier le comportement d'un échantillon soumis à une variation de température. Les techniques conventionnelles de l'analyse thermique sont : l'analyse thermogravimétrique (ATG), la calorimétrie différentielle à balayage (DSC), l'analyse thermique différentielle (ATD), l'analyse thermomécanique (TMA) et l'analyse mécanique dynamique (DMA). Parmi ces techniques, l'ATG est la technique communément utilisée pour l'étude des phases de décomposition thermique des composés [8]. Elle a donc été utilisée dans la présente étude.

2.1.3.1 Principe de l'analyse thermogravimétrique

La thermogravimétrie (TG) est la branche de l'analyse thermique qui permet d'examiner la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température ou du temps selon que l'appareil fonctionne respectivement en mode dynamique ou en mode isotherme. L'analyse thermogravimétrique est l'une des techniques les plus utilisées pour étudier les phases de décomposition thermique d'un composé et la cinétique des processus physico-chimiques qui s'y produisent. Elle est réalisée à l'aide d'un analyseur thermogravimétrique dont le principe consiste à suivre la variation de masse d'un composé soumis à un programme de température spécifique dans un environnement gazeux (inerte ou réactif) contrôlé. Le schéma synoptique d'un analyseur thermogravimétrique est présenté par la Figure 2.7.

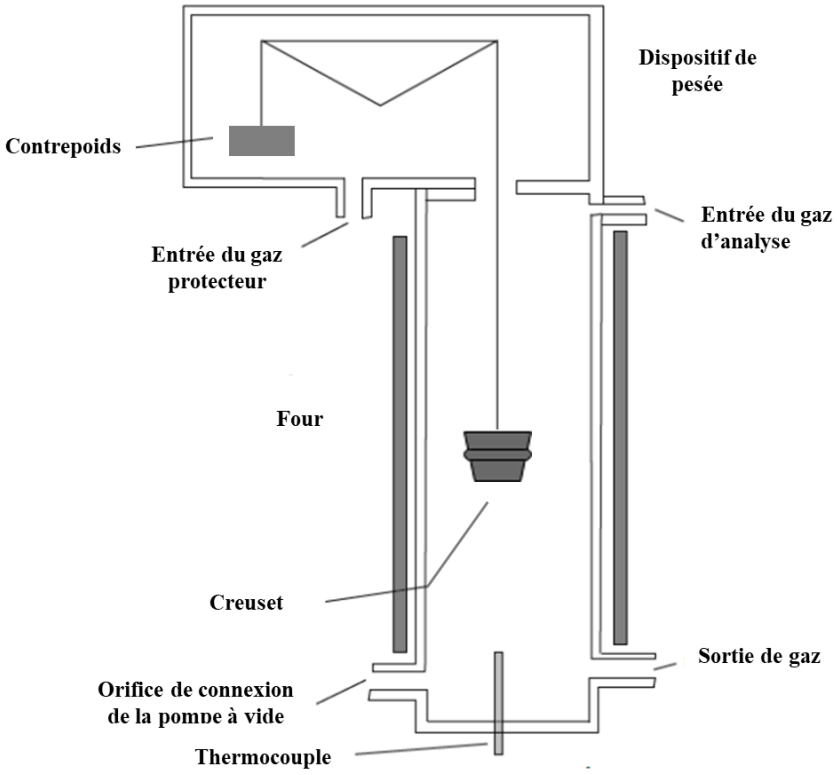


Figure 2.7. Schéma synoptique d'un analyseur thermogravimétrique [8]

Les paramètres tels que la masse, le volume et la forme physique de l'échantillon, la forme et la nature du porte-échantillon, la nature et le débit de gaz d'analyse, la vitesse de chauffe du four, etc. influencent fortement les courbes thermogravimétriques enregistrées. L'établissement des conditions optimales pour l'analyse TG d'un échantillon nécessite pour cela de nombreux tests préliminaires la plupart du temps. Les produits gazeux dégagés lors d'une mesure TG constituent une source d'informations cruciale pour l'échantillon analysé. Ces gaz sont généralement analysés par couplage de l'analyseur thermogravimétrique à un analyseur de gaz approprié. Il existe les couplages avec les spectromètres de masse (TG-MS), les spectromètres infrarouges à transformée de Fourrier (TG-FTIR), les chromatographes (TG-GC), etc.

2.1.3.2 Description de l'analyseur thermogravimétrique utilisé

L'appareil utilisé est un analyseur thermogravimétrique de type Setsys Evolution de la marque SETARAM. Le système est constitué d'une microbalance électronique permettant de mesurer une perte de masse maximale de 400 mg avec une précision de 0,4 µg. L'argon (Ar) est utilisé comme gaz protecteur de la microbalance. L'appareil contient également un four dont les résistances chauffantes permettent une élévation de la température jusqu'à 1250 °C avec une vitesse de chauffe maximale de 100 °C.min^{-1}. Au cours de l'analyse, l'échantillon est suspendu

à la microbalance de telle sorte qu'il soit placé au niveau du point le plus chaud du four et la température est continuellement mesurée à l'aide d'un thermocouple. L'environnement gazeux inerte ou réactif du système est créé à partir d'une pompe qui vide le gaz présent dans la zone de réaction avant chaque analyse et le gaz d'analyse voulu est ensuite introduit avec un débit compris entre 4 et 200 ml.min^{-1}. Ce gaz d'analyse pénètre dans la zone de réaction par la partie supérieure de la microbalance et en ressort par sa partie inférieure. L'analyseur thermogravimétrique utilisé dans la présente étude est présentée par la Figure 2.8.

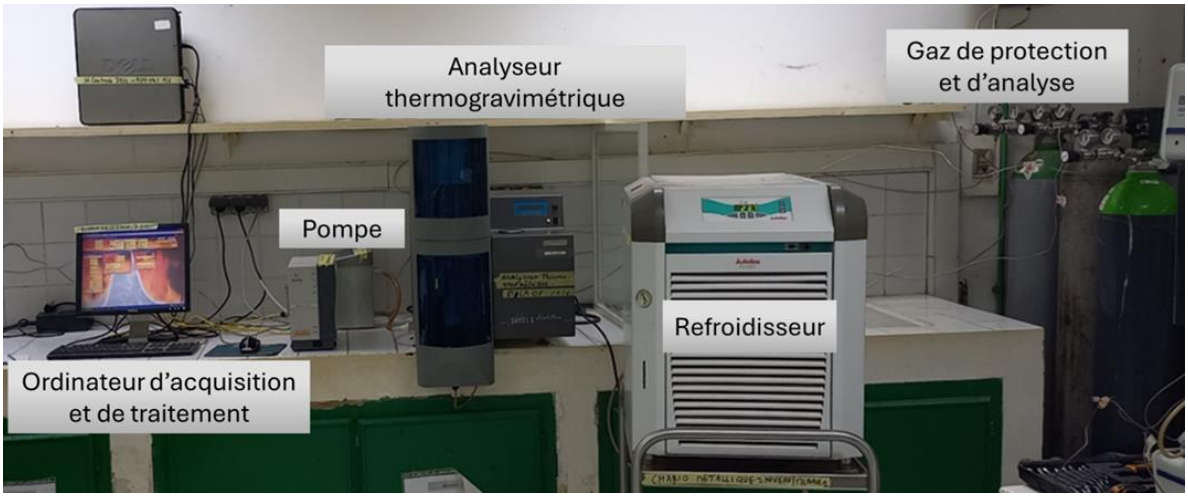


Figure 2.8. Analyseur thermogravimétrique, type Setsys Evolution/SETARAM

2.1.3.3 Protocole des analyses thermogravimétriques sous atmosphère inerte et oxydante

Les comportements thermiques sous atmosphère inerte et oxydante des échantillons ont été étudiés par analyse thermogravimétrique. Ainsi, les biomasses ont préalablement été broyées et tamisées pour obtenir des tailles de particule inférieures à 315 µm. Une prise d'essai de 10 mg a été pesée dans un creuset en alumine d'une capacité maximale de 170 µl et introduite à l'intérieur du four de l'ATG. L'échantillon a ensuite été chauffé suivant le programme de température 25-800 °C. Ce programme a d'abord consisté en une isotherme à 25 °C pendant 10 minutes, suivie d'une rampe de 25 à 800 °C à la vitesse de chauffe β. Enfin, une autre isotherme à 800 °C pendant 10 minutes a été effectuée avant d'entamer la phase de refroidissement du four.

Les analyses sous atmosphère inerte (pyrolyse) ont été réalisées en utilisant le diazote (N_2) comme gaz d'analyse avec un débit de 20 ml.min^{-1} et une vitesse de chauffe du four de 10 °C.min^{-1}. Les analyses sous atmosphère oxydante (combustion) ont été réalisées à quatre vitesses de chauffe du four à savoir 5, 10, 15 et 20 °C.min^{-1}. Le gaz d'analyse utilisé était l'air pur dont la composition est : 21 % O_2 et 79 % N_2. Il a été introduit dans le four avec un débit

de 20 ml.min^{-1}. Le choix de quatre vitesses de chauffe est justifié par l'étude de la cinétique de décomposition thermique ultérieure.

2.1.4 Etude de la cinétique de décomposition thermique

La variation de l'énergie d'activation et du facteur pré-exponentiel au cours de la décomposition thermique de BBa, TPo et TPo.d a été étudiée suivant les méthodes isoconversionnelles de Friedman, Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) et de Vyazovkin. Les équations mathématiques de ces méthodes proviennent soit de la forme différentielle de la loi cinétique : $\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta}.exp\left(\frac{-E}{RT}\right).f(\alpha)$, soit de la forme intégrale de celle-ci : $g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta}\int_{T0}^{T} exp\left(\frac{-E}{RT}\right) dT$

2.1.4.1 Méthode de Friedman

La méthode de Friedman est une méthode non-isotherme qui provient de la forme différentielle de la loi cinétique. Elle est basée sur l'équation (2.13) qui est obtenue en réarrangeant la forme différentielle de la loi cinétique et en y appliquant le logarithme népérien :

$$ln[\beta_k(\frac{d\alpha}{dT})_\alpha] = ln[f(\alpha)A_\alpha] - \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha,k}} \qquad (2.13)$$

L'énergie d'activation en fonction de l'avancement de la réaction α est déterminée à partir de la pente du tracé de $ln[\beta_k(\frac{d\alpha}{dT})_\alpha]$ en fonction de $(\frac{1000}{T_{\alpha,k}})$.

2.1.4.2 Méthode Kissinger-Akahira-Sunose (KAS)

La méthode KAS est basée sur la forme intégrale de la loi cinétique. Elle utilise une approximation développée par Murray et White $p\left(\frac{E}{RT}\right) = \frac{\exp\left(\frac{-E}{RT}\right)}{\left(\frac{E}{RT}\right)^2}$. Ainsi, la forme intégrale de la loi cinétique est réarrangée telle que décrite dans la littérature [92-94] pour aboutir à l'équation (2.14) :

$$ln\left(\frac{\beta_i}{T_{\alpha i}^2}\right) = ln\left(\frac{R\,A_\alpha}{E_\alpha g(\alpha)}\right) - \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha i}} \qquad (2.14)$$

L'énergie d'activation E_α est obtenue à partir de la pente du tracé du graphe $ln(\frac{\beta_i}{T_{\alpha i}^2})$ en fonction de $(\frac{1000}{T_{\alpha i}})$ pour une fraction donnée du degré de conversion α.

2.1.4.3 Méthode de Vyazovkin

La méthode de Vyazovkin utilise l'intégration numérique de la forme intégrale de l'équation cinétique pour déterminer une valeur précise de l'énergie d'activation E_α pour un degré de

conversion donné α. Cette méthode consiste à minimiser la fonction ci-dessous (équation (2.15)) pour une série d'analyses effectuées à différentes vitesses de chauffe [95].

$$\Phi(E_\alpha) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \neq 1}^{n} \frac{I(E_\alpha, T_{\alpha,i})\beta_j}{I(E_\alpha, T_{\alpha,j})\beta_i} \quad (2.15)$$

Où l'intégrale de température I (E_α, T_α) telle que présentée par l'équation (2.16) est résolue numériquement.

$$I(E_\alpha, T_\alpha) = \int_0^{T_\alpha} exp\,(\frac{-E_\alpha}{RT})dT \quad (2.16)$$

La minimisation est effectuée pour une fraction donnée du degré de conversion α pour obtenir les différentes valeurs de E_α.

Le calcul des paramètres cinétiques à partir des méthodes ci-dessus mentionnées a été effectué en utilisant les résultats des analyses thermogravimétriques à quatre vitesses de chauffe à savoir 5, 10, 15 et 20 °C.min^{-1}.

2.1.5 Détermination des paramètres thermodynamiques

Sur la base des paramètres cinétiques E_α et A_α, les grandeurs thermodynamiques tels que l'enthalpie (ΔH_α), l'énergie libre de Gibbs (ΔG_α) et l'entropie (ΔS_α) liées à la décomposition thermique des différents échantillons ont été calculées pour chaque degré de conversion α. Les calculs ont été effectués pour la vitesse de chauffe de 10 °C.min^{-1} à partir des équations suivantes :

$$\Delta H_\alpha = E_\alpha - RT_\alpha \quad (2.17)$$

$$\Delta G_\alpha = E_\alpha + RT_{peak}\, ln\left(\frac{K_B T_{peak}}{h\, A_\alpha}\right) \quad (2.18)$$

$$\Delta S_\alpha = \frac{\Delta H_\alpha - \Delta G_\alpha}{T_{peak}} \quad (2.19)$$

Où : T_α représente la température au degré de conversion α, T_{peak} est la température au taux de décomposition maximal, K_B (1,381.10^{-26} kJ. K^{-1}) est la constante de Boltzmann et h (6,662.10^{-37} kJ. s) est la constante de Planck.

2.2 Résultats et discussions

2.2.1 Caractérisations physico-chimiques

2.2.1.1 Analyse immédiate, quantification de la matière grasse et pouvoir calorifique

Le Tableau 2.1 présente les résultats de l'analyse immédiate (teneurs en humidité, matières volatiles, cendre et carbone fixe), de la détermination du taux de matière grasse résiduelle et du pouvoir calorifique supérieur (PCS) des six échantillons BBa, BBu, BBs, TPo, TPs, TPo.d et du bois d'eucalyptus (BE) pris comme référence. Les résultats montrent que les teneurs en matière grasse résiduelle des boues de barattage sont supérieures à 23 % avec une plus forte teneur dans l'échantillon BBu (28,82 %). Les boues de barattage présentent des teneurs en matière grasse résiduelle plus élevées que celles des tourteaux de presse TPo (19,79 %), TPs (18,48 %) et TPo.d (3,14 %). Cela indique que la technique de barattage, qui est un procédé traditionnel d'extraction du beurre de karité est moins efficace que le procédé de pressage mécanique. En outre, il a été observé que lorsque la teneur en matière grasse résiduelle des biomasses étudiées augmente, leur PCS augmente également. Ainsi, le PCS est passé de 20,93 $MJ.kg^{-1}$ pour les tourteaux de presse déshuilés TPo.d à environ 24 $MJ.kg^{-1}$ pour les tourteaux de presse TPo et TPs puis à près de 27 $MJ.kg^{-1}$ pour les boues de barattage BBa, BBu et BBs. Ce résultat montre également que le PCS des boues de barattage et des tourteaux de presse est supérieur à celui du bois d'eucalyptus (18,46 $MJ.kg^{-1}$) qui est l'une des espèces de bois de chauffe les plus utilisées au Burkina Faso. Ces valeurs sont également plus élevées que celles des PCS de nombreux autres résidus agroalimentaires tels que les tourteaux d'olive (17,10 $MJ.kg^{-1}$), les tourteaux de sésame (19,78 $MJ.kg^{-1}$) et les tourteaux de neem (18,2 $MJ.kg^{-1}$) [96-98].

Le taux de matières volatiles de TPo.d (65,84 %) est inférieur à ceux des boues de barattage et des tourteaux de presse bruts. Ainsi, le déshuilage a conduit à la réduction de la teneur en matières volatiles des tourteaux de presse. De plus, les taux de matières volatiles des biomasses étudiées sont tous inférieurs à celui de BE (82,30 %).

Les taux de cendre de BBa, BBu, BBs, TPo, TPs et TPo.d sont respectivement de 3,65 ; 3,68 ; 3,13 ; 4,69 ; 4,75 et 6,15 %. Bien que supérieurs à celui de BE (0,75 %), ces taux de cendre sont inférieurs à ceux de nombreux autres résidus agricoles utilisés comme combustibles solides tels que les tourteaux d'olive (11,6 %) [99], la cabosse de cacao (12,1 %) [100], la balle de riz (18,3) [101], etc. En outre, la teneur en cendre des biomasses est intimement liée au point de collecte ainsi qu'au procédé de traitement qu'elles subissent. Ainsi, la relative faible teneur en cendre des boues de barattage BBa, BBu et BBs serait probablement due au phénomène de lixiviation

des minéraux dû aux différentes étapes de lavage de la pâte pendant le processus de fabrication du beurre de karité. En effet, au cours du barattage, les ions cationiques et anioniques pourraient se dissoudre dans l'eau et conduire à une baisse des minéraux dans le résidu final.

Tableau 2.1. Analyses immédiates, quantification de la matière grasse et pouvoir calorifique des biomasses

	BBa	BBu	BBs	TPo	TPs	TPo.d	BE (référence)
% Humidité	6,90	7,50	7,54	5,90	5,40	7,10	10,27
% Matières volatiles[a]	72,30	75,90	74,04	72,28	72,25	65,84	82,30
% Cendre[a]	3,65	3,68	3,13	4,69	4,75	6,15	0,75
% Carbone fixe[a,b]	24,05	20,42	22,83	23,04	23,00	28,01	16,95
% Matière grasse[c]	24,23	28,82	23,41	19,79	18,48	3,14	n.a
PCS[c] (MJ/kg)	27,70	27,77	26,47	23,12	24,59	20,93	18,46

[a] Sur base sèche; [b] Calculé par différence; [c] Sur base brute; n.a.: non analysé

2.2.1.2 Analyse ultime et quantification des macromolécules

Le Tableau 2.2 présente les résultats de l'analyse ultime et la quantification des macromolécules des différentes biomasses étudiées. L'analyse ultime a consisté en la détermination des teneurs en carbone, hydrogène, azote, oxygène, soufre et chlore. Les macromolécules quantifiées sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Les résultats ont montré que le carbone et l'oxygène sont les principaux constituants élémentaires des biomasses. Les rapports H/C sont presque similaires pour tous les échantillons (~ 0,09) mais les tourteaux de presse (déshuilés et non déshuilés) présentent des rapports O/C plus élevés que ceux des boues de barattages.

Par ailleurs, une forte teneur en azote et en soufre n'est pas souhaitable pour les biocombustibles du fait que la présence de ces éléments chimiques entraîne des émissions de polluants tels que les oxydes d'azote NOx et de soufre SOx pendant la combustion [102]. La teneur en azote des biomasses varie de 2 à 2,97 % avec la plus forte valeur obtenue pour TPo.d. Ainsi, les résidus de transformation des amandes de karité ont des teneurs en azote plus élevées que celui du bois d'eucalyptus (0,1 %). Cela est dû au fait que les résidus oléagineux contiennent en général une grande quantité de protéines qui sont des molécules azotées. Cependant, les taux d'azote des biomasses étudiées sont inférieurs à ceux d'autres résidus de plantes oléagineuses rapportés dans la littérature tels que les tourteaux de jatropha (4 à 6 %) [102], les résidus d'huile de moutarde (5,3 %) [56], les tourteaux de soja (7,12 %) [103].

L'analyse des macromolécules glucidiques des six échantillons a montré que leurs proportions ont le même ordre de grandeur, avec une quantité totale d'environ 20 %. Les teneurs en hémicellulose sont proches de celles rapportées dans la littérature pour les tourteaux de tournesol (5,16 %) [104] et les tourteaux de jatropha (5,5 %) [102]. Les boues de barattage BBa, BBu et BBs ont présenté des teneurs plus élevées en lignine comparativement aux tourteaux de presse TPo et TPs.

Tableau 2.2. Macromolécules et composition élémentaire des biomasses

		BBa	BBu	BBs	TPo	TPs	TPo.d	BE [105]
Macromolécules[a]	% Cellulose	11,63	14,81	13,31	14,24	15,94	n.a.	47,6
	% Hémicellulose	7,68	8,38	3,65	5,70	5,87	n.a.	22,1
	% Lignine	37,33	34,71	36,40	23,84	26,85	n.a.	30,30
Composition élémentaire[a]	% C	58,18	58,66	58,01	54,03	55,67	50,35	45,7
	% H	5,21	5,42	5,25	4,58	5,36	4,28	5,86
	% N	2,71	2,48	2,66	2,42	2,00	2,97	0,1
	% S	0,18	0,17	0,19	0,22	0,22	0,25	0,02
	% Cl	0,02	0,03	0,03	0,08	0,08	0,09	n.a
	% O[b]	30,04	29,60	30.75	34,08	32,03	36,04	48,32
	H/C	0,09	0,09	0,09	0,08	0,10	0,08	0,13
	O/C	0,52	0,50	0,53	0,63	0,57	0,72	1,06

[a] Sur base sèche; [b] Calculé par différence ; n.a.: non analysé

2.2.1.3 Analyse des éléments minéraux

Les résultats de l'analyse minérale des cendres des boues de barattage BBa, BBu, BBs et des tourteaux de presse TPo, TPs et TPo.d sont présentés dans le Tableau 2.3. La quantité totale d'éléments minéraux détectés dans les échantillons est décroissante dans l'ordre de : tourteaux de presse déshuilés TPo.d (~ 46 000 $mg.kg^{-1}$) > tourteaux de presse TPs, TPo (~ 27 000 $mg.kg^{-1}$) > et boues de barattage BBs, BBu, BBa (~ 22 300 $mg.kg^{-1}$). Les principaux éléments minéraux, c'est-à-dire, ceux dont la teneur est supérieure à 1000 $mg.kg^{-1}$ contenus dans les biomasses étudiées sont la silice sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), le phosphore (P) puis les éléments alcalins et alcalino-terreux comprenant le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). Les tourteaux de presse TPo, TPs et TPo.d ont montré une concentration plus élevée en élément K et Mg comparativement aux boues de barattage BBa, BBu et BBs ; ces dernières ont des taux de silicium les plus grands. Toutes les biomasses ont présenté de

faibles concentrations (c'est-à-dire de l'ordre de 100 à 1000 $mg.kg^{-1}$) en éléments Al et Fe puis des traces (c'est-à-dire dont la teneur < 100 $mg.kg^{-1}$) en éléments Na, Mn, Zn et Cu.

Tableau 2.3. Composition minérale des cendres des biomasses étudiées

Minéraux (mg/kg)	BBa	BBu	BBs	TPo	TPs	TPo.d
Na	60,33	56,49	62,46	23,27	15,58	46,20
K	8250,63	8777,13	10244,30	18908,30	19093,2	20443,50
Mg	1132,09	1052,68	1220,34	1891,00	1792,24	2013,06
Ca	2873,41	2057,06	1793,05	1763,36	1692,89	1831,61
B	15,00	13,00	15,00	18,00	17,00	17,00
Mn	9,00	13,00	11,00	11,00	9,00	29,00
P	846,57	901,35	1179,05	1743,92	1716,62	1992,47
Al	262,65	341,04	409,58	101,78	62,17	374,26
Fe	245,01	954,48	747,1	220,25	102,16	927,77
Cu	2,20	2,30	2,10	2,00	2,00	6,50
Zn	31,00	23,00	24,00	20,00	23,00	31,00
SiO_2	8563,00	8115,00	6589,00	2237,00	2165,00	18262,00

2.2.1.4 Densité apparente en vrac des biomasses

La Figure 2.9 présente les résultats de la densité apparente en vrac des boues de barattage BBa, BBu, BBs, des tourteaux de presse bruts TPo, TPs et des tourteaux de presse déshuilés TPo.d. Les valeurs obtenues sont présentées sur base brute. Les boues de barattage ont des densités apparentes plus faibles (~340-351 $kg.m^{-3}$) comparativement aux tourteaux de presse bruts (~429-434 $kg.m^{-3}$) et déshuilés (~584 $kg.m^{-3}$). Ces valeurs de densité apparente de toutes les biomasses de cette étude sont faibles comparativement à celle des granulés de bois (600-750 $kg.m^{-3}$). Etant donné que les biocombustibles qui présentent une grande densité apparente sont plus économiques à stocker, à transporter et ont de facto une grande densité volumique d'énergie, les faibles valeurs des biomasses étudiées représentent une limite technique quant à leur valorisation énergétique. La densification en biocombustibles briquettes peut être une solution pour accroître la densité apparente de ces biomasses.

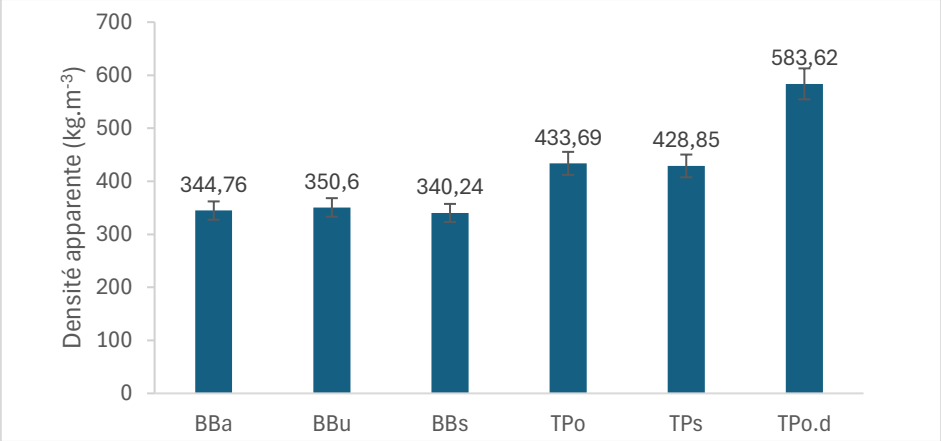


Figure 2.9. Densités apparentes des biomasses étudiées

La caractérisation physico-chimique des six échantillons issus des techniques de traitement des amandes de karité par barattage et pressage mécanique a montré que :

- Dans le lot des boues de barattage, BBa, BBu et BBs ont des propriétés physico-chimiques de mêmes ordres de grandeur avec une légère variation de la teneur en matière grasse résiduelle ;
- Dans le lot des tourteaux de presse, TPo et TPs ont également des propriétés similaires et différentes de celles des boues de barattage ;
- Les tourteaux de presse déshuilés TPo.d ont des propriétés différentes de celles des tourteaux de presse et des boues de barattage.

Au regard de ces résultats, trois échantillons ont été retenus dont un dans chaque lot (boues de barattage, tourteaux de presse bruts et tourteaux de presse déshuilés) pour la suite de l'étude. Il s'agit des boues de barattage BBa, des tourteaux de presse TPo et des tourteaux de presse déshuilés TPo.d.

2.2.2 Analyse granulométrique

La Figure 2.10 présente la répartition granulométrique des échantillons broyés de BBa, TPo et TPo.d. Les résultats montrent que la distribution granulométrique de ces trois échantillons varie d'une biomasse à une autre en dépit du fait qu'ils aient tous été broyés dans un broyeur muni d'un tamis de 2 mm d'ouverture. Ces distributions granulométriques des trois échantillons sont continues de 1,6 à 0,063 mm. Les résultats montrent également que 30, 48 et 70 % des tailles de particules de TPo, TPo.d et BBa respectivement sont comprises entre 63 et 400 µm. Ainsi, BBa a une distribution granulométrique dominée par des particules de petites tailles, tandis que celles de TPo et TPo.d sont dominées par des particules de tailles grossières. Cette différence dimensionnelle des particules est liée à la technique de traitement des amandes de karité. Le

barattage qui fait intervenir une étape de mouture des amandes de karité génère des résidus constitués de fines particules contrairement à la technique de pressage mécanique dans laquelle les amandes concassées sont directement pressées pour en extraire l'huile.

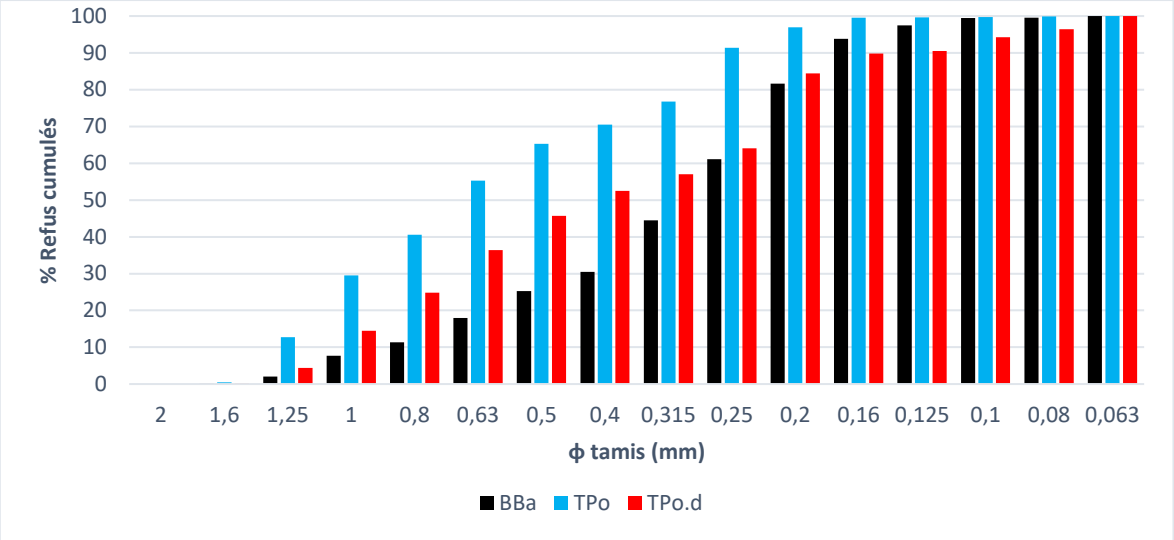


Figure 2.10. Distribution granulométrique de BBa, TPo et TPo.d

2.2.3 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourrier (FTIR)

Les bandes spectrales de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourrier de BBa, TPo et TPo.d sont présentées par la Figure 2.11. L'analyse des graphes montre que les bandes spectrales de ces trois biomasses ne présentent pas une différence significative ; les bandes observées sont quasiment les mêmes pour BBa, TPo et TPo.d. Les bandes larges observées à 3311 cm^{-1} correspondent aux liaisons d'étirement O-H des polysaccharides. Les signaux observés à 2917 et 2853 cm^{-1} peuvent être attribués aux vibrations d'étirement de la liaison C-H indiquant la présence de groupes aliphatiques méthylènes -CH_2- et de groupes méthyles -CH_3- des polysaccharides et triglycérides. La bande qui apparait à 1728 cm^{-1} est caractéristique de la fonction C=O des esters, tandis que celle située vers 1700 cm^{-1} correspond à la fonction C=O des acides carboxyliques. Ces résultats confirment la présence des matières grasses dans les échantillons. Dans l'échantillon BBa, la bande 1700 cm^{-1} est particulièrement marquée, ce qui indique une présence notable d'acides carboxyliques. En revanche, cette même bande est quasiment absente dans les échantillons TPo et TPo.d, traduisant une concentration beaucoup plus faible, voire négligeable, en acides carboxyliques. Cette différence s'explique par un phénomène d'hydrolyse des triglycérides présents dans BBa au cours du barattage et séchage des boues humides. Sous l'effet de l'humidité, de l'agitation mécanique et possiblement de la température, les liaisons ester des triglycérides ont été partiellement rompues, conduisant à la

formation d'acides carboxyliques libres, ce qui justifie l'intensité accrue de la bande à 1700 cm^{-1} dans cet échantillon. Le pic observé à 1149 cm^{-1} dans les spectres de BBa et TPo, mais pratiquement absent dans celui de TPo.d, correspond à la vibration d'élongation de la liaison C–O. Les pics observés à 1605 et 1433 cm^{-1} correspondent respectivement à la vibration C=C et à la déformation C-H du cycle aromatique de la lignine. Enfin, les pics situés à 1200 et 1030 cm^{-1} peuvent être attribués à l'élongation C-O-C de la cellulose, caractéristiques des liaisons éther présentes dans la structure des polysaccharides. Ces bandes sont typiques des composés constitutifs de la biomasse végétale, tels que la cellulose et les hémicelluloses [106,107].

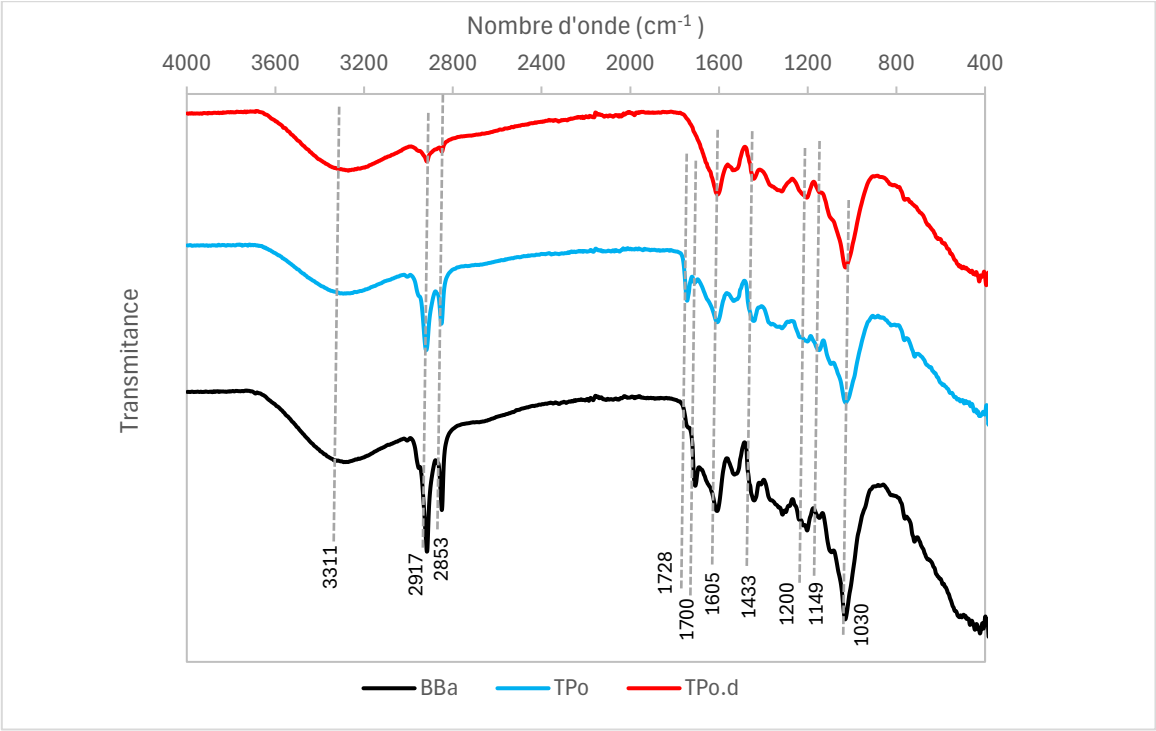


Figure 2.11. Analyse FTIR de BBa, TPo et TPo.d

2.2.4 Analyses thermogravimétriques

2.2.4.1 Analyses thermogravimétriques sous atmosphère inerte

La Figure 2.12 présente les courbes de perte de masse (TG) et leurs dérivées (dTG) en fonction de la température des trois biomasses BBa, TPo et TPo.d sous atmosphère inerte (N_2) à la vitesse de chauffe de 10 °C.min^{-1}. L'analyse de ces courbes de perte de masse permet d'élucider les différentes phases de leur décomposition thermique. Les résultats montrent que les graphes dTG des boues de barattage (BBa) et des tourteaux de presse brutes (TPo) ont des tendances similaires, avec quatre pics distincts. Cependant, trois pics distincts et un épaulement sont

observés sur la courbe dTG des tourteaux de presse déshuilés (TPo.d). La vitesse de perte de masse maximale de BBa apparaît à la température de 256,27 °C, tandis que celles de TPo et TPo.d interviennent à des températures plus élevées d'environ 322 °C. La perte de masse initiale enregistrée à la température d'environ 100 °C est due à la déshydratation (séchage) des biomasses. De façon générale, le processus de pyrolyse des biomasses peut être résumé par l'équation :

$$Biomasse \xrightarrow{\Delta,\ N_2} \underbrace{Matière\ volatile + biochar}_{dévolatilisation} \qquad (2.20)$$

La dévolatilisation de la biomasse aboutit à un dégagement de matières gazeuses (gaz condensables et incondensables) et une formation de matière carbonée dite « biochar ». Il a été observé que l'essentiel de la dévolatilisation des biomasses étudiées (Figure 2.12) a lieu dans la gamme de température de 150 à 450 °C (zone de pyrolyse active). La décomposition thermique de la matrice solide et de la matière grasse résiduelle se chevauchent légèrement. Le pic qui est apparu à la température d'environ 260 °C est relatif à la décomposition thermique de l'hémicellulose, des protéines et des acides gras [89]. Les boues de barattage BBa ont montré une vitesse de décomposition thermique maximale de 0,416 mg.min^{-1}. Cette valeur est plus élevée que celles de TPo et TPo.d en raison de sa forte teneur en matière grasse résiduelle. Le pic qui apparaît à environ 330 °C est attribué à la décomposition thermique de la cellulose. La dernière étape de perte de masse des biomasses s'est produite à environ 405 °C et est liée à la décomposition thermique du triacylglycérol et de la lignine.

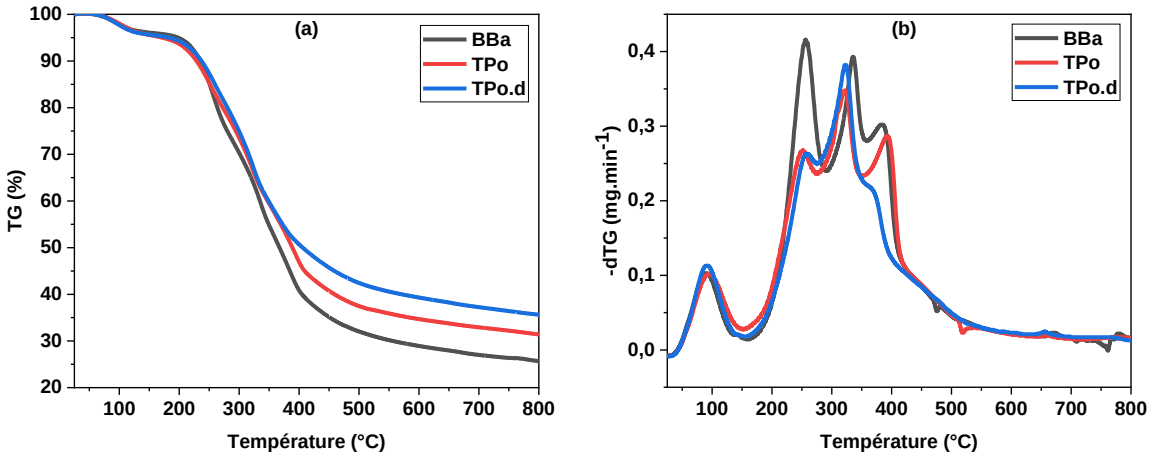


Figure 2.12. (a) TG et (b) dTG courbes de BBa, TPo et TPo.d sous atmosphère inerte (N_2)

Le Tableau 2.4 synthétise les grandeurs caractéristiques de la pyrolyse des biomasses étudiées. Les pertes de masses à la température de 800 °C ont été déterminées à partir des courbes TG. La valeur relative à la décomposition thermique de TPo.d (64,37 %) est moins élevée que celles

de TPo (68,61 %) et BBa (74,33 %). Cette tendance se justifie par le taux de carbone fixe élevé de TPo.d (28,01 %) comparativement à ceux de TPo (23,04 %) et de BBa (24,05 %). Étant donné que la réactivité thermique est inversement proportionnelle à la température du pic de décomposition maximale, (T_m pic), les boues de barattages apparaissent thermiquement plus réactives en milieu inerte que les tourteaux de presse bruts et déshuilés.

Tableau 2.4. Caractéristiques de la pyrolyse de BBa, TPo et TPo.d à 10 °C.min^{-1}

Biomasse	Intervalle de température de la phase de pyrolyse active (°C)	T_m pic (°C)	Vitesse de perte de masse maximale (mg.min^{-1})	Perte de masse globale (%)
BBa	158-420	256,27	0,416	74,33
TPo	158-420	322,45	0,348	68,61
TPo.d	158-400	322,69	0,382	64,37

2.2.4.2 Analyses thermogravimétriques sous atmosphère oxydante

Les tracés des courbes TG et dTG des biomasses BBa, TPo, TPo.d et du bois d'eucalyptus (BE) en présence d'air à la vitesse de chauffe de 10 °C.min^{-1} sont présentées par la Figure 2.13. Les graphes TG et dTG montrent que le processus de combustion des biomasses se compose principalement de trois phases de décomposition thermique. La première phase qui a lieu à des températures comprises entre 25 et 160 °C est due à la déshydratation ou séchage des échantillons. Cette phase de séchage est suivie par une perte de masse rapide due à la libération de matières volatiles (dévolatilisation) et à la formation d'un résidu carboné (biochar). Elle est connue sous l'appellation « phase de pyrolyse-oxydative » et correspond à la combustion de la biomasse en phase gazeuse [108]. Cette phase de décomposition thermique couvre la plage de température 160-400 °C pour BBa et TPo. Dans cette gamme de température, les courbes dTG de BBa et TPo présentent une apparence similaire, attribuée à la décomposition thermique de la cellulose, l'hémicellulose et la matière grasse résiduelle. Cependant, les courbes dTG de TPo.d et de BE ne présentent qu'un seul pic dans la phase de pyrolyse-oxydative. L'apparition d'un épaulement sur les courbes dTG de BBa et TPo pourrait être liée à leur teneur élevée en matière graisse résiduelle. Lawer-Yolar et al. [109] ont en effet montré que la courbe dTG de la combustion de la matière grasse végétale présente en général plusieurs pics de décomposition, spécifiquement vers la température d'environ 250 °C. La troisième phase de

décomposition thermique est attribuable à la combustion du biochar (résidu carboné) et a lieu à des températures comprises entre 400 et 550 °C pour toutes les biomasses.

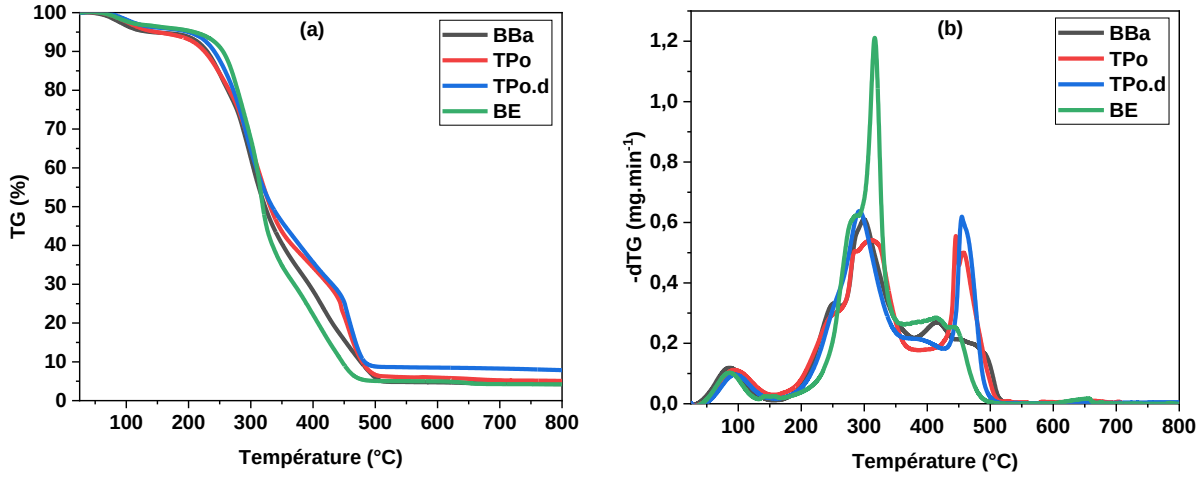


Figure 2.13. (a) TG et (b) dTG courbes de BBa, TPo et TPo.d sous atmosphère oxydante (air)

La performance de la combustion de BBa, TPo, TPo.d et BE à la vitesse de chauffe de 10 °C.min^{-1} a été évaluée par les paramètres caractéristiques tels que la température d'allumage (T_a), les températures des pics maximums et de fin de combustion puis les vitesses de décompositions maximales ($(dm/dt)_{max}$) des deux phases de décomposition thermique. Ces paramètres caractéristiques sont présentés dans le Tableau 2.5. Les températures d'allumage (T_a) ont été déterminées à partir de la méthode d'extrapolation sur les courbes dTG et TG proposée par Li et al. [110]. D'abord, une ligne verticale traversant le premier pic de la courbe dTG au point A est tracée et le point d'intersection entre cette ligne et la courbe TG est noté B. Ensuite, une ligne tangentielle à la courbe TG passant par le point B est tracée. Cette ligne tangentielle rencontre l'extension de la ligne initiale de la courbe TG au point C. Enfin, une autre ligne verticale passant par le point C est tracée, et la température qui correspond à cette ligne représente Ta. Cette méthode a été appliquée aux courbes TG et dTG de BBa, TPo, TPo.d et BE (Figure 2.14).

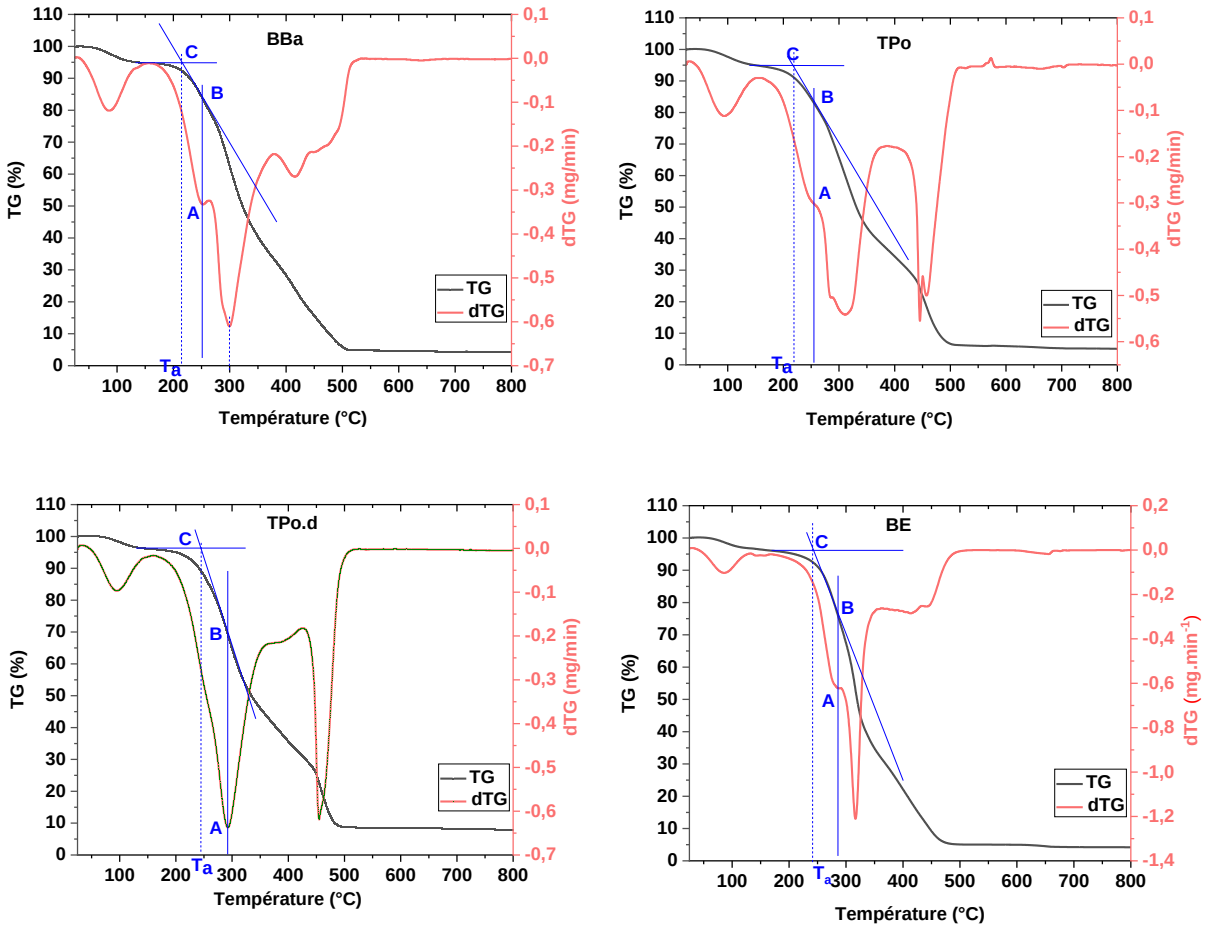


Figure 2.14. Températures d'allumage de BBa, TPo, TPo.d et BE

La température de fin de combustion (T_f) a quant à elle été identifiée comme étant celle à partir de laquelle il n'y a plus de perte de masse significative. Les résultats ont montré que les températures d'allumage de BBa, TPo, TPo.d et BE sont respectivement de 215, 220, 244 et 244 °C. Les faibles valeurs liées à BBa et TPo comparativement à celle de BE implique une plus grande inflammabilité de ces résidus par rapport à ce dernier. BBa présente la plus faible valeur de T_a due à sa grande teneur en matière grasse résiduelle. Les vitesses de décomposition thermiques maximales $(dm/dt)_{max2}$ de la phase pyrolyse-oxydative sont toutes supérieures à 0,5 $mg.min^{-1}$; cela signifie que les biomasses étudiées sont toutes thermiquement réactives. Cependant, BE a la plus grande vitesse de décomposition thermique ($(dm/dt)_{max2}$ = 1,21 $mg.min^{-1}$). Ce résultat s'explique par la forte teneur en matière volatile de cette biomasse (82,3 %). En outre, les $(dm/dt)_{max3}$ de TPo (0,5 $mg.min^{-1}$) et de TPo.d (0,62 $mg.min^{-1}$) sont plus élevées que celles de BBa (0,27 $mg.min^{-1}$) et de BE (0,28 $mg.min^{-1}$). Une telle différence serait due à l'effet catalytique des éléments minéraux et à la disponibilité des sites actifs à la surface des biochars de TPo et de TPo.d. Pour tous les échantillons, les vitesses de décomposition thermique de la phase 2 sont supérieures à celles de la phase 3 ($(dm/dt)_{max2}$>$(dm/dt)_{max3}$). Ainsi, la phase de dévolatilisation est l'étape la plus rapide dans l'étude de la combustion des

biomasses BBa, TPo et TPo.d. Ce résultat est en phase avec ceux rapportés par Idris et al. [108] dont les travaux ont porté sur les résidus du palmier à huile, Munir et al. [111] qui se sont intéressés à la bagasse de canne à sucre et aux tiges de coton puis Wang et al. [112] qui ont étudié la combustion de la balle de riz, la sciure de bois et les tiges de maïs par ATG.

Tableau 2.5. Paramètres caractéristiques de la combustion de BBa, TPo, TPo.d et BE à 10 °C.min^{-1}

Biomasse	T_a (°C)	Phase pyrolyse-oxydative		Phase oxydation du biochar		T_f (°C)	Perte de masse globale (%)
		T_{peak2} (°C)	$(dm/dt)_{max2}$ (mg.min^{-1})	T_{peak3} (°C)	$(dm/dt)_{max3}$ (mg.min^{-1})		
BBa	215	300	0,61	415	0,27	543	95,20
TPo	220	311	0,54	457	0,50	525	93,82
TPo.d	244	292	0,63	455	0,62	523	91,34
BE (référence)	244	317	1,21	412	0,28	525	95,80

La vitesse de chauffe peut significativement influencer le processus de combustion. Elle peut affecter la perte de masse finale, les températures des pics dTG et les différentes étapes de la décomposition thermique [113]. De plus, l'évaluation de l'effet qu'exerce la vitesse de chauffe sur les phases de décomposition thermique permet de vérifier si les réactions qui se déroulent au cours du processus sont compétitives ou non, et donne une indication sur l'approche cinétique appropriée pour la détermination des paramètres cinétiques [114]. Ainsi, l'effet de la vitesse de chauffe sur le comportement thermique de BBa, TPo et TPo.d sous atmosphère oxydante a été étudié à quatre vitesses de chauffe : 5, 10, 15 et 20 °C.min^{-1}. Les courbes TG et dTG correspondantes sont présentées par la Figure 2.15. Il a été observé qu'une augmentation de la vitesse de chauffe de 5 à 20 °C.min^{-1} n'exerce, d'une part aucune influence sur le nombre d'étapes de décomposition thermique des résidus, et d'autre part, les pertes de masse sont quasiment constantes. Cependant, un léger décalage des pics de décomposition thermique vers les températures élevées a été observé. Ce décalage des pics s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse de chauffe, survient une différence entre les températures externes et internes de la biomasse. Vu que le transfert de chaleur de l'extérieur à l'intérieur de cette biomasse prend un certain temps, il se produit un effet d'hystérésis de température [115].

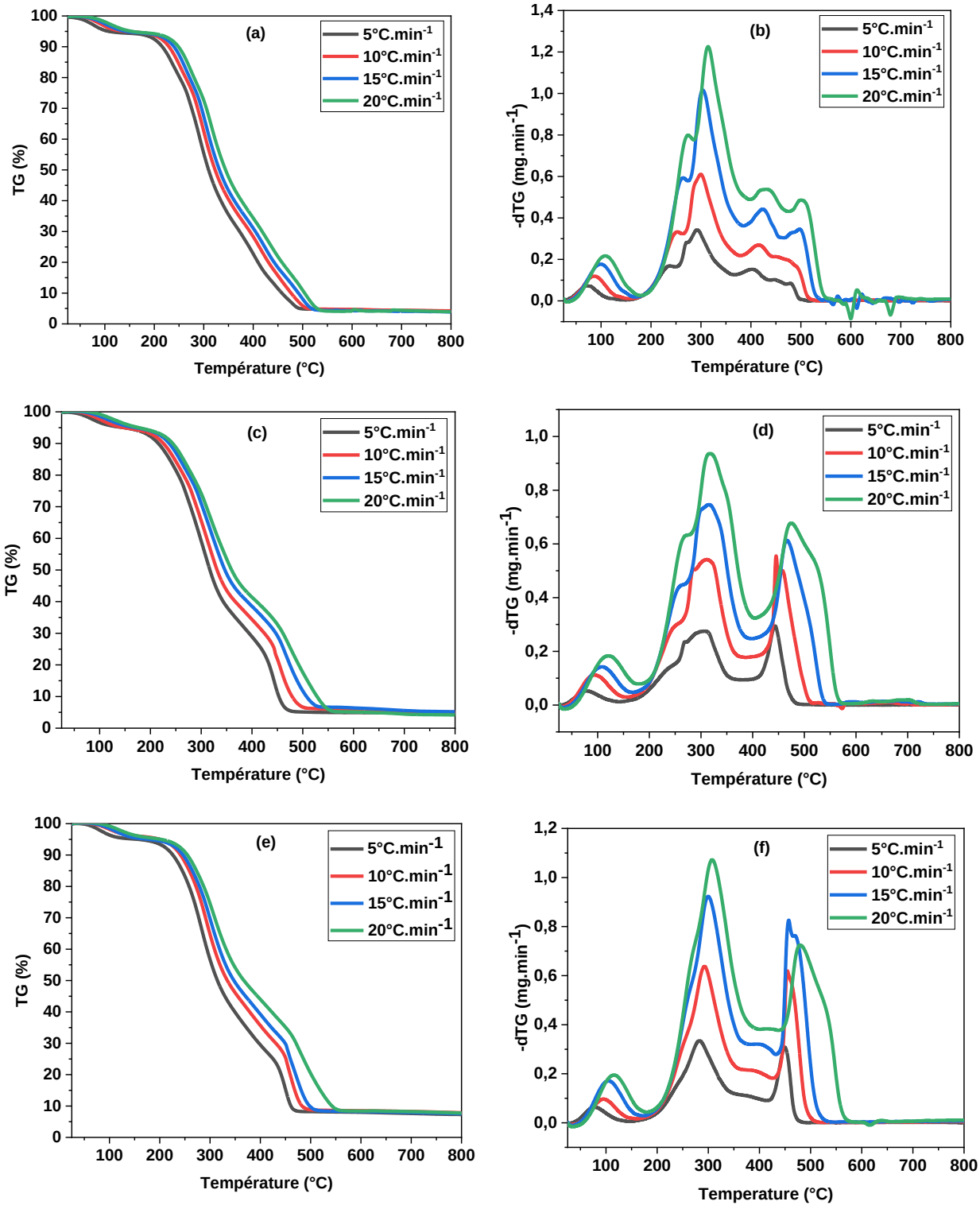


Figure 2.15. TG et dTG courbes de la combustion de (a, b) BBa, (c, d) TPo et (e, f) TPo.d à 5, 10, 15 et 20 °C.min^{-1}

2.2.5 Etude cinétique de la décomposition thermique sous atmosphère oxydante

Les paramètres cinétiques à savoir l'énergie d'activation et le facteur pré-exponentiel de BBa, TPo et TPo.d ont été déterminés à partir des résultats des analyses thermogravimétriques menées à quatre vitesses de chauffage différentes à savoir 5, 10, 15 et 20 °C. min^{-1}. L'étude

cinétique a été réalisée sous atmosphère oxydante et les paramètres cinétiques ont été calculés pour les phases de décomposition thermique pyrolyse-oxydative et oxydation du biochar. Les plages de température utilisées pour chaque vitesse de chauffe sont présentées dans le Tableau 2.6. L'analyse des courbes TG et dTG a montré que quelle que soit la vitesse de chauffe considérée, les phases de décomposition thermique restent inchangées pour chaque biomasse et les pertes de masse totales restent approximativement constantes. Cela suggère que les réactions qui se produisent lors de la décomposition thermique des biomasses étudiées ne sont pas compétitives. Par conséquent, l'approche isoconversionnelle peut être appliquée pour l'étude de leurs paramètres cinétiques [116].

Tableau 2.6. Plages de température utilisées pour l'étude cinétique

	BBa		TPo		TPo.d	
Vitesse de chauffe	Température (°C)					
($°C.min^{-1}$)	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale
5	152,27	507,78	142,36	517,05	150,32	515,35
10	158,32	530,88	164,14	523,67	160,23	519,84
15	172,72	547,57	171,62	549,32	173,67	568,98
20	182,32	576,55	180,42	610,56	181,03	601,50

2.2.5.1 Tracés des méthodes de Friedman et KAS

Trois méthodes isoconversionnelles à savoir les méthodes de Friedman, de Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) et de Vyazovkin telles que décrites précédemment ont été appliquées pour déterminer les paramètres cinétiques de décomposition thermique des biomasses. La dépendance de l'énergie d'activation E_α par rapport au degré de conversion α a été étudiée pour chaque biomasse. Le degré de conversion α a été pris entre 0,01 (correspondant à 1 % de la masse totale d'échantillon décomposé) et 0,95 (correspondant à 95 % de la masse totale d'échantillon décomposé). La Figure 2.16 montre les tracés linéaires des méthodes de Friedman et KAS pour chaque biomasse. Il a été observé que les droites isoconversionnelles de la combustion des trois biomasses étudiées ne sont pas toutes parallèles. L'absence de parallélisme signifie que la réactivité thermochimique de ces biomasses ne peut être régie par une cinétique mono-étape. Ainsi, la cinétique multi-étape serait la mieux indiquée pour l'étude de la décomposition thermique de ces biomasses. L'analyse de l'évolution des valeurs de l'énergie d'activation en fonction du degré de conversion α est une étape déterminante qui permettra de confirmer ou infirmer ce résultat.

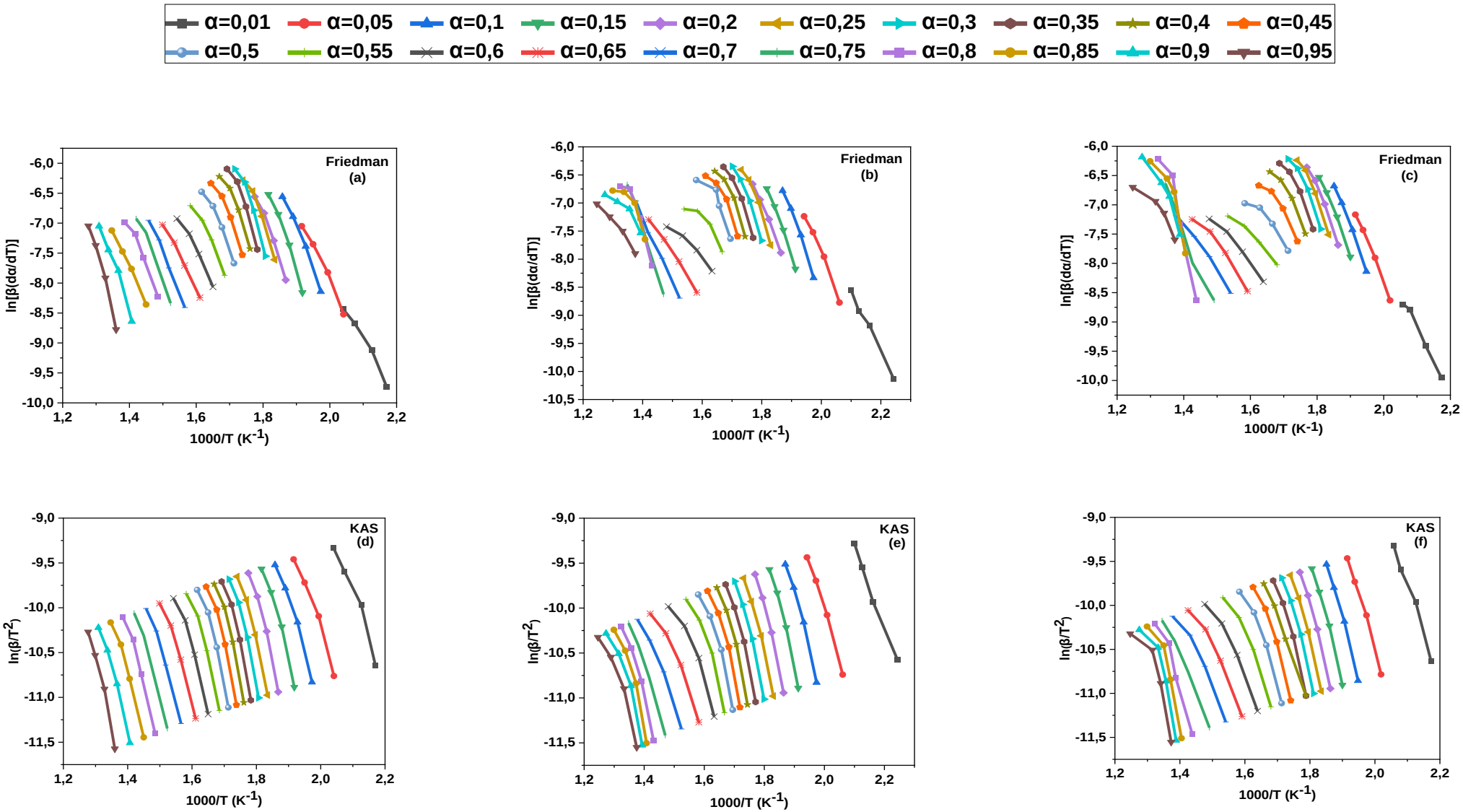


Figure 2.16. Tracés des méthodes de Friedman et KAS de (a, d) BBa, (b, e) TPo et (c, f) TPo

2.2.5.2 Energie d'activation par les méthodes de Friedman, KAS et Vyazovkin

L'énergie d'activation est l'énergie nécessaire pour emmener les molécules d'un composé de leur état stable à un état dit de ''transition'' dans lequel les réactions peuvent facilement se produire. Il s'agit de la quantité minimale d'énergie requise pour déclencher une réaction chimique. Les biomasses qui présentent les valeurs d'énergie d'activation les plus élevées ont tendance à se décomposer plus lentement. Le Tableau 2.7 présente les énergies d'activation des trois biomasses considérées dans la présente étude.

Tableau 2.7. Energies d'activation E_α de la combustion de BBa, TPo et TPo.d

α	BBa			TPo			TPo.d		
	Friedman	KAS	Vyazovkin	Friedman	KAS	Vyazovkin	Friedman	KAS	Vyazovkin
	E_α (kJ.mol^{-1})								
0,01	86,54	80,9	82,59	93,89	74,62	86,64	102,29	91,84	97,56
0,05	97,19	85,57	95,22	108,81	91,5	104,6	117,74	104,48	113,25
0,1	113,95	94,57	111,97	123,96	105,63	120,28	125,19	113,01	121,42
0,15	132,23	107,17	128,61	123,55	114,74	121,5	120,99	116,83	118,22
0,2	125,07	117,99	122,95	108,62	115,48	105,99	117,87	116,94	116,15
0,25	119,27	117,41	119,95	112,17	110,87	113,09	113,26	115,67	111,07
0,3	132,48	119,61	129,83	111,95	110,81	108,87	103,55	112,54	102,19
0,35	125,13	121,9	123,9	105,64	109,28	102,12	92,84	107,31	90,19
0,4	111,72	120,69	110,88	94,11	104,98	90,35	82,55	100,33	79,94
0,45	105,72	117,01	107,74	81,76	98,62	81,64	68,75	92,07	69,12
0,5	102,03	112,67	102,1	67,83	91,14	68,93	53,18	81,39	52,8
0,55	94,92	107,23	93,15	48,43	80	47,51	47,69	69,92	47,7
0,6	89,68	100,74	88,9	45,22	66,52	45,7	55,31	62,94	56,17
0,65	92,95	96,51	93,54	66,46	62,69	69,57	61,32	61,11	61,53
0,7	112,8	99,74	116,22	95,38	69,52	97,06	69,51	61,97	70,05
0,75	117,59	106,67	118,1	130,72	85,42	133,22	117,11	71,15	123,12
0,8	105,72	109,27	105,36	106,18	97,51	101,3	145,8	92,05	149,79
0,85	102	105,94	102	64,45	93,82	61,81	82,57	97,35	77,32
0,9	130,94	110,93	138,27	45,5	84,37	45,65	42,54	87,36	40,73
0,95	170,68	130,85	179,48	56,83	77,13	59,05	34,73	76,08	34,88
E_α moyenne	113,43	108,17	113,54	89,57	92,23	88,24	87,74	91,62	86,66

Il a été observé qu'en considérant la décomposition thermique globale, les valeurs moyennes E_α de TPo (89,57 ; 92,23 et 88,24 kJ.mol^{-1}) et de TPo.d (87,74 ; 91,62 et 86,66 kJ. mol^{-1}) sont inférieures à celles de BBa (113,43 ; 108,17 et 113,54 kJ.mol^{-1}). Cependant, de α=0,01 à α=0,15, ce qui correspond à environ 250 °C à 10 °C.min^{-1}, les valeurs moyennes E_α liées à la

réactivité thermochimique de TPo (112,55, 96,62 et 108,26 $kJ.mol^{-1}$) et de TPo.d (116,55, 106,54 et 112,61 $kJ.mol^{-1}$) sont plus élevées que celles de BBa (107,48, 92,05 et 104,60 $kJ.mol^{-1}$). En effet, la matière grasse résiduelle dans les tourteaux de karité commence à se décomposer à peu près à cette température (250 °C). BBa ayant la teneur en matière grasse résiduelle la plus élevée, sa décomposition thermique se fait plus rapidement et cela correspond à sa faible température d'allumage observée au paragraphe précédent (215 °C). Par ailleurs, les valeurs de E_α obtenues à partir de la méthode de Friedman sont très proches de celles obtenues à partir de la méthode Vyazovkin.

En outre, la Figure 2.17 présente les tracés de l'énergie d'activation E_α en fonction de α obtenus à partir des méthodes de Friedman, KAS et Vyazovkin. Il a été observé que E_α varie significativement avec α, ce qui traduit un changement de mécanisme réactionnel au cours de la décomposition thermique des biomasses (cinétique multi-étapes). Deux phases de décomposition thermique sont distinguées : la phase 1 correspond à la plage $\alpha \in [0,01, 0,6]$ et la phase 2 concerne la plage $\alpha \in [0,65, 0,95]$. Dans la première phase de décomposition thermique correspondant à la combustion en phase homogène des biomasses, les valeurs moyennes de E_α obtenues sont : BBa (110,24 ; 106,82 et 108,74 $kJ.mol^{-1}$), TPo (95,61 ; 97,92 et 93,25 $kJ.mol^{-1}$) et TPo.d (94,13 ; 99,42 et 92,03 $kJ.mol^{-1}$). Lorsque α a atteint la combustion en phase hétérogène, c'est-à dire 0,65, les valeurs moyennes de E_α relatives à la décomposition thermique de TPo et TPo.d ont diminué. Cependant, celle de BBa a connu une légère augmentation quel que soit le modèle cinétique. Cette tendance est due à l'effet catalytique des éléments alcalins. En effet, plusieurs auteurs ont souligné l'effet catalytique des éléments alcalins sur différentes biomasses au cours de leur combustion [117-120]. Dans la présente étude, l'analyse physico-chimique a montré que la quantité totale d'éléments alcalins et alcalino-terreux (K, Mg, Ca et Na) détectée dans les échantillons suit l'ordre croissant ci-après : BBa (~12 316,46 $mg.kg^{-1}$) < TPo (~22 585,93 $mg.kg^{-1}$) < TPo.d (~24 334,37 $mg.kg^{-1}$). Ainsi, les quantités totales d'éléments alcalins et alcalino-terreux de TPo.d et de TPo sont deux fois plus élevées que celle de BBa.

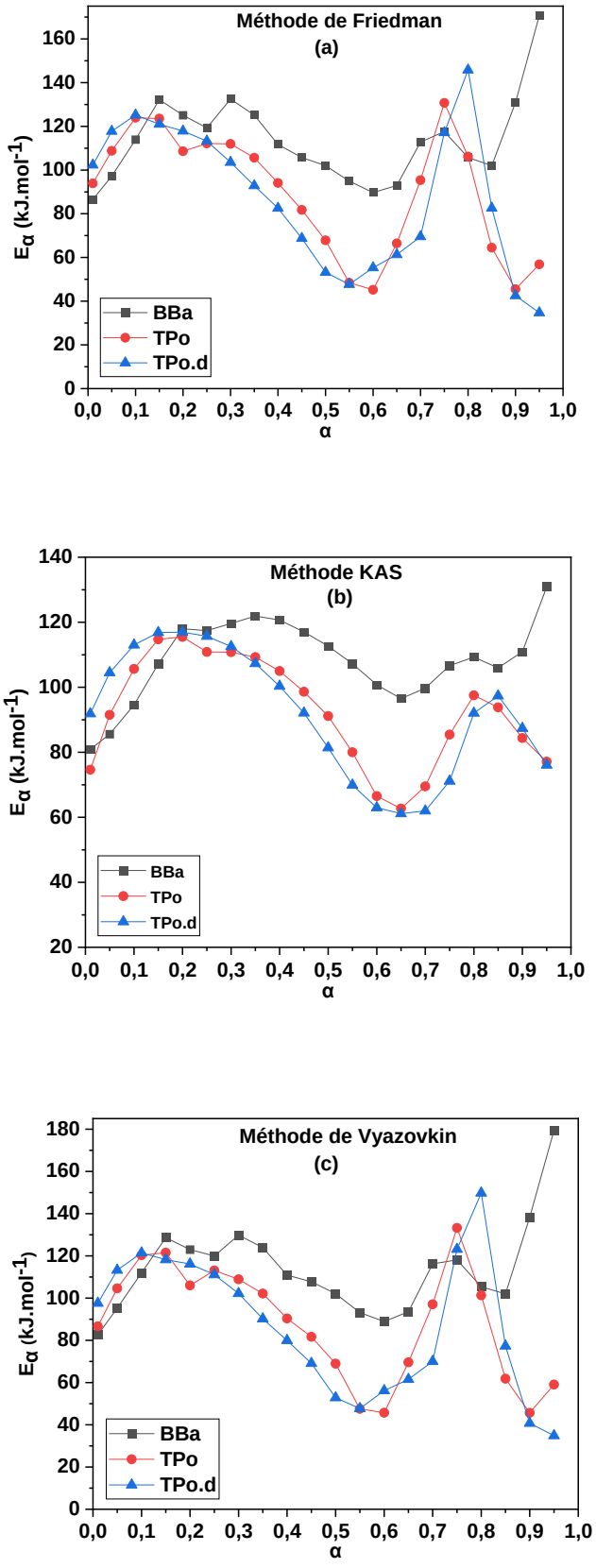


Figure 2.17. Evolution de l'énergie d'activation en fonction de l'avancement x à partir des modèles de (a) Friedman, (b) KAS et (c) Vyazovkin

2.2.5.3 Variation du facteur pré-exponentiel en fonction de l'avancement α

Le facteur pré-exponentiel A_α a été calculée en fonction de α compris entre 0,01 à 0,95 en considérant la fonction de conversion f(α)=1-α des réactions de premier ordre. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 2.8. Il a été observé que les facteurs pré-exponentiels A_α varient également avec *α*. Cela confirme la complexité des réactions qui se produisent lors de la décomposition thermique des biomasses étudiées [121]. Plus A_α est élevé, plus le processus de décomposition est facile et rapide, c'est-à-dire qu'une valeur plus grande de A_α correspond à une réactivité plus élevée [22]. Si l'on considère la méthode de Friedman, lorsque *α* varie de 0,01 à 0,15, la valeur moyenne de A_α liée à BBa (1,69E+09 s^{-1}) est supérieure à celles de TPo (6,51E+08 s^{-1}) et TPo.d (7,19E+08 s^{-1}). Cela est dû à la capacité de cet échantillon à s'enflammer plus rapidement.

Tableau 2.8. Facteurs pré-exponentiels A_α en fonction de α de la combustion de BBa, TPo et TPo.d

α	BBa			TPo			TPo.d		
	Friedman	KAS	Vyazovkin	Friedman	KAS	Vyazovkin	Friedman	KAS	Vyazovkin
	A_α (s^{-1})								
0,01	4,52E+05	6,47E+04	1,87E+05	4,65E+06	2,10E+04	7,57E+05	2,27E+07	1,26E+06	7,48E+06
0,05	5,16E+06	2,66E+05	3,40E+06	8,89E+07	1,50E+06	3,39E+07	5,11E+08	2,44E+07	1,85E+08
0,1	1,91E+08	2,37E+06	1,22E+08	1,72E+09	3,66E+07	7,40E+08	1,87E+09	1,52E+08	7,82E+08
0,15	6,58E+09	3,85E+07	2,90E+09	7,89E+08	2,16E+08	4,86E+08	4,75E+08	2,90E+08	2,57E+08
0,20	7,89E+08	3,36E+08	4,90E+08	1,88E+07	1,72E+08	1,06E+07	1,84E+08	2,37E+08	1,27E+08
0,25	1,95E+08	2,25E+08	2,32E+08	3,37E+07	4,61E+07	4,15E+07	5,70E+07	1,49E+08	3,57E+07
0,30	2,72E+09	3,05E+08	1,56E+09	2,43E+07	3,66E+07	1,27E+07	5,92E+06	6,38E+07	4,41E+06
0,35	4,55E+08	4,25E+08	3,57E+08	4,97E+06	2,11E+07	2,41E+06	4,82E+05	1,73E+07	2,74E+05
0,40	2,08E+07	2,72E+08	1,76E+07	3,60E+05	6,81E+06	1,66E+05	4,22E+04	3,20E+06	2,45E+04
0,45	4,29E+06	1,00E+08	6,46E+06	2,34E+04	1,45E+06	2,32E+04	1,77E+03	4,44E+05	1,92E+03
0,50	1,37E+06	3,13E+07	1,39E+06	1,11E+03	2,47E+05	1,39E+03	5,24E+01	3,61E+04	4,82E+01
0,55	2,08E+05	7,43E+06	1,45E+05	1,61E+01	1,93E+04	1,33E+01	1,17E+01	2,43E+03	1,14E+01
0,60	4,47E+04	1,36E+06	3,81E+04	5,11E+00	8,83E+02	5,45E+00	3,55E+01	4,21E+02	4,17E+01
0,65	5,09E+04	3,80E+05	5,69E+04	1,71E+02	2,79E+02	3,04E+02	8,20E+01	2,15E+02	8,75E+01
0,70	7,74E+04	4,54E+05	2,44E+06	2,21E+04	7,23E+02	3,09E+04	2,72E+02	1,90E+02	3,04E+02
0,75	1,28E+06	1,12E+06	2,61E+06	8,47E+06	9,93E+03	1,35E+07	8,83E+05	8,04E+02	2,66E+06
0,80	2,31E+06	1,26E+06	2,18E+05	1,75E+05	7,03E+04	8,39E+04	1,16E+08	2,78E+04	2,43E+08
0,85	2,29E+05	4,83E+05	8,49E+04	2,09E+02	3,30E+04	1,43E+02	4,51E+03	6,27E+04	2,05E+03
0,90	8,53E+04	7,74E+05	2,77E+07	1,20E+01	6,10E+03	1,25E+01	9,04E+00	1,07E+04	7,16E+00
0,95	8,07E+06	1,56E+07	1,88E+10	9,44E+01	1,77E+03	1,31E+02	3,82E+00	1,62E+03	3,92E+00

2.2.5.4 Comparaison de l'exactitude des modèles de Friedman, KAS et Vyazovkin appliqués à la combustion des biomasses

La précision des paramètres cinétiques de décomposition thermique des biomasses est un élément crucial dans la conception d'équipements adaptés à leurs conversions thermochimiques. De ce fait, la vérification de l'exactitude des valeurs calculées est très importante et recommandée par le Comité International d'Analyse Thermique et Calorimétrie (ICTAC en Anglais). L'exactitude des valeurs qui proviennent des méthodes de Friedman, KAS et Vyazovkin a été vérifiée à l'aide de la méthode proposée par Vyazovkin et al. [63]. Ainsi, les paramètres cinétiques calculés (E_α et A_α) ont été utilisés pour simuler des courbes d'analyse thermogravimétrique notées TG calculée et ces dernières ont été comparées aux courbes TG expérimentales. Ces courbes simulées et expérimentales réalisées aux quatre vitesses de chauffe 5, 10, 15 et 20 °C.min^{-1} sont présentées par la Figure 2.18. En outre, le logiciel NETZSCH Kinetics Neo version 2.6.6 a été utilisé pour le traitement statistique. Le Tableau 2.9 donne un comparatif de ces paramètres statistiques pour chaque modèle cinétique. Les coefficients de corrélation moyens globaux R^2 des trois méthodes sont tous supérieurs à 0,97. Cependant, la somme des carrés des écarts et les valeurs du test de Fisher (F-test) de la méthode de KAS sont très élevées quelle que soit la biomasse. Ces résultats statistiques se perçoivent sur les courbes de la Figure 2.18 où l'on observe un grand écart entre les courbes simulées et expérimentales. Ainsi, la méthode KAS ne convient pas à l'étude cinétique des boues de barattage (BBa) ainsi que des tourteaux de presse bruts (TPo) et déshuilés (TPo.d) contrairement aux méthodes de Friedman et de Vyazovkin.

Tableau 2.9. Analyse statistique des méthodes de Friedman, KAS et Vyazovkin

	BBa			TPo			TPo.d		
	Friedman	KAS	Vyazovkin	Friedman	KAS	Vyazovkin	Friedman	KAS	Vyazovkin
R^2 moyen	0,9999	0,9808	0,9998	0,9996	0,9775	0,9996	0,9993	0,9799	0,9992
Résidu moyen	0,477	5,211	0,507	0,669	5,306	0,674	0,769	4,769	0,798
Somme des carrés des écarts	585,258	75078,773	653,843	1396,645	83696,977	1580,710	2559,213	72160,406	2941,595
F-test	1,000	128,283	1,117	1,000	59,927	1,132	1,000	28,196	1,149

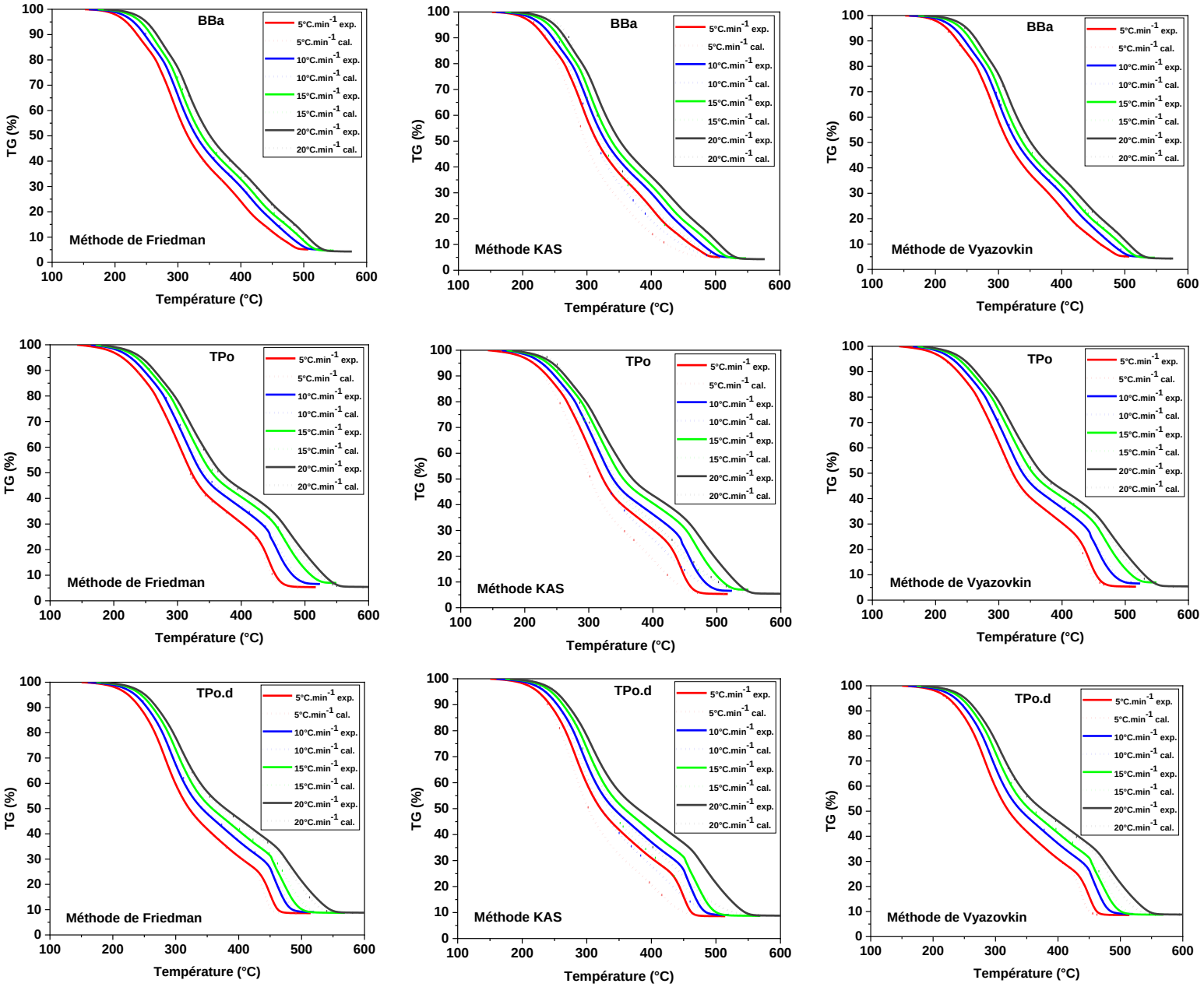


Figure 2.18. Courbes expérimentales et simulées

2.2.6 Paramètres thermodynamiques de la décomposition thermique des biomasses sous atmosphère oxydante

Les paramètres thermodynamiques, à savoir l'enthalpie (ΔH_α), l'énergie libre de Gibbs (ΔG_α) et l'entropie (ΔS_α) de la combustion de BBa, TPo et TPo.d à la vitesse de chauffe de 10 °C.min^{-1} ont été déterminés. Ces grandeurs ont été calculées à partir de la méthode de Friedman et leurs variations en fonction du degré de conversion α sont présentées par les graphes de la Figure *2.19*. ΔH_α et E_α présentent des tendances similaires et les valeurs de ΔH_α sont toutes positives. Lorsque α est compris entre 0,01 et 0,15, on observe une augmentation de l'enthalpie ΔH_α quelle que soit la biomasse et BBa présente la valeur moyenne la plus basse (~413 kJ.mol^{-1}) comparativement à TPo (~433 kJ.mol^{-1}) et TPo.d (~450 kJ.mol^{-1}). Cet accroissement de ΔH_α indique que les réactions qui ont lieu sont endothermiques, de l'énergie est donc requise par les molécules pour déclencher les réactions de décomposition. Cette étape de la décomposition thermique correspond en effet à l'allumage et le résultat démontre que BBa nécessite une quantité d'énergie inférieure à celles de TPo et TPo.d pour rompre les liaisons moléculaires. A partir de α=0,15 jusqu'à α=0,6, les valeurs de l'enthalpie ΔH_α diminuent avant de s'accroître à nouveau. Cette diminution de ΔH_α montre que les réactions qui ont lieu sont exothermiques ; l'étape de dévolatilisation active des biomasses est atteinte et une certaine quantité d'énergie est dégagée. Les valeurs de barrière énergétique EB (EB = Eα - ΔHα) de la combustion des trois biomasses étudiées augmentent avec α et leurs moyennes sont sensiblement égales à 5 kJ.mol^{-1}. Cela indique que la décomposition thermique en milieu oxydant des boues de barattage et des tourteaux de presse bruts ou déshuilés est favorable [123]. Les valeurs moyennes globales de ΔG_α sont de 331,01, 292,18 et 282,30 kJ.mol^{-1} pour BBa, TPo et TPo.d respectivement. Les valeurs positives de ΔG_α obtenues indiquent un comportement non spontané des réactions qui se produisent lors de la combustion des tourteaux d'amandes de karité. L'entropie est une grandeur thermodynamique qui traduit le désordre dans un système (ou au cours d'un processus). Toutes les valeurs de ΔSα sont négatives, ce qui indique que le degré de désordre associé aux produits est inférieur à celui des réactifs initiaux.

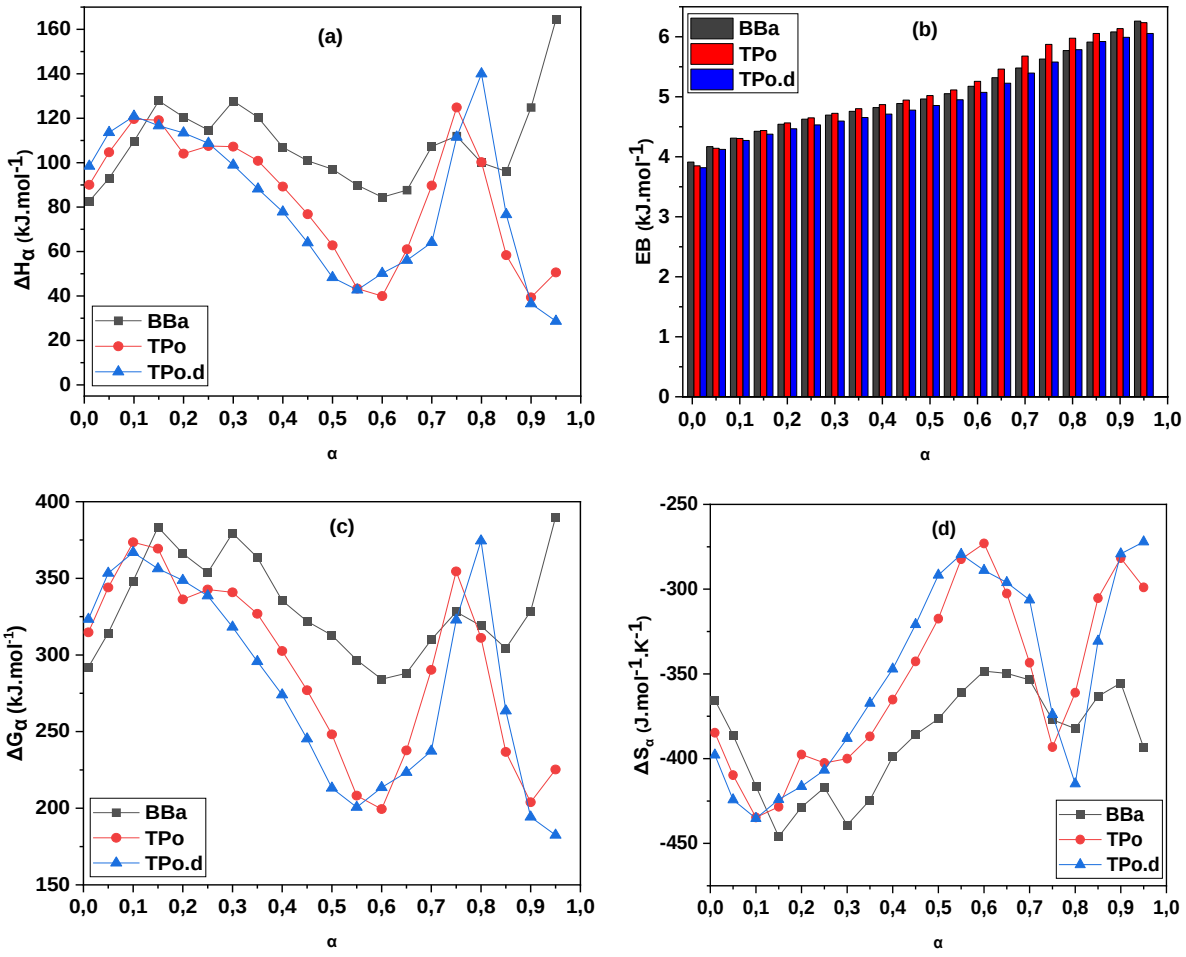


Figure 2.19. Variation de (a) l'enthalpie (ΔHα), (b) la barrière énergétique (EB), (c) l'enthalpie libre (ΔGα) et l'entropie (ΔSα) en fonction du degré de conversion α

Conclusion partielle

La caractérisation des résidus de transformation des amandes de karité (BBa, BBu, BBs, TPo, TPs et TPo.d) a révélé que les résidus issus du barattage des amandes de karité ont des teneurs en matière grasse résiduelle plus élevées que celles des résidus issus du pressage mécanique de ces amandes. Ces biomasses ont présenté des pouvoirs calorifiques supérieurs (PCS) allant de 20,93 $MJ.kg^{-1}$ pour les résidus déshuilés à 27,77 $MJ.kg^{-1}$ pour les boues de barattage. Ces valeurs sont toutes plus élevées que celle du bois d'eucalyptus (18,46 $MJ.kg^{-1}$). La quantité totale d'éléments minéraux détectés dans les boues de barattage BBa, BBu et BBs (~ 22 300 $mg.kg^{-1}$) est moins élevée que celles détectées dans les tourteaux de presse TPo et TPs (~ 27 000 $mg.kg^{-1}$) et déshuilés TPo.d (~ 46 000 $mg.kg^{-1}$) ; l'étape du barattage a contribué à la dissolution de certains minéraux dans l'eau. Les similitudes des caractéristiques par lot des

six résidus collectés nous ont emmené à retenir les trois échantillons BBa, TPo et TPo.d pour la suite des travaux.

Parmi les trois modèles utilisés pour l'étude cinétique, le modèle de Friedman a donné les meilleurs ajustements avec les données expérimentales ; il est donc le plus précis pour la détermination des paramètres cinétiques de décomposition thermique des résidus de transformation des amandes de karité.

Les résidus TPo ($E_{\alpha moy}$~112,55 kJ.mol^{-1}) et TPo.d ($E_{\alpha moy}$~116,55 kJ.mol^{-1}) ont présenté des valeurs d'énergie d'activation élevées au début de leur décomposition thermique comparativement à BBa ($E_{\alpha moy}$~107,48 kJ.mol^{-1}) mais ces valeurs ont graduellement diminué au cours de la combustion. TPo et TPo.d sont donc devenus plus réactifs sous l'effet catalytique des éléments alcalins.

Les résultats obtenus dans cette première partie des travaux ont montré que quel que soit le procédé de fabrication du beurre de karité (barattage ou pressage mécanique), les résidus générés ont un potentiel énergétique élevé et sont favorables à la conversion thermochimique. Cependant, ils présentent de faibles densités apparentes, ce qui diminue leur densité énergétique volumique et pourrait rendre difficile leur utilisation, stockage et transport.

Chapitre 3 :

Optimisation de la densification des boues de barattage et des tourteaux de presse

Chapitre 3 : Optimisation de la densification des boues de barattage et des tourteaux de presse

Introduction

Les biocombustibles représentent une importante source d'énergie renouvelable, accessible et disponible partout dans le monde contrairement aux sources d'énergie fossile. Cependant, leur pouvoir calorifique réputé faible par rapport à celui des combustibles fossiles traditionnels constitue un obstacle majeur à leur utilisation. Lorsque ce faible pouvoir calorifique est conjugué à une faible masse volumique, le volume de biomasse requis pour produire une même quantité d'énergie croît considérablement à cause de la faible quantité d'énergie par unité de volume. La densification est un moyen d'accroître cette densité volumique d'énergie et de réduire les problèmes liés à l'utilisation dans les foyers à combustion domestiques et industriels, au transport et au stockage des biomasses. Ainsi, ce chapitre vise à déterminer les conditions optimales de densification de BBa et TPo en biocombustibles briquettes par application de la méthodologie de surface de réponse (MSR). Contrairement à la méthode d'expérimentation dite ''classique'' qui permet d'étudier l'effet d'un paramètre à la fois sur une variable dépendant donnée, la MSR présente l'avantage d'étudier les effets simultanés de plusieurs paramètres sur plusieurs variables dépendants et de faire l'optimisation.

Le chapitre est subdivisé en trois grandes sections.

Dans la première section, la densification des deux résidus sélectionnés à savoir BBa et TPo en biocombustibles briquettes est présentée ; les facteurs principaux et secondaires y sont décrits ainsi que les différentes réponses (variables dépendants). Les effets de ces facteurs sur les réponses ont été étudiés à l'aide du plan de surface de réponse Box-Behnken.

Dans la deuxième section, les conditions optimales de densification qui confèrent les meilleures propriétés mécaniques et thermiques aux biocombustibles briquettes de BBa et TPo ont été déterminées à partir des fonctions de désirabilité.

Enfin, dans la dernière section, les propriétés des briquettes optimisées de BBa et TPo sont déterminées à travers des analyses physico-chimiques, le pouvoir calorifique supérieur, des tests d'efficacité thermique et des analyses à la microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie de rayon X à dispersion d'énergie (MEB/EDX).

3.1 Matériel et méthodes

3.1.1 Production des biocombustibles briquettes

3.1.1.1 Matériel de briquetage

La production des biocombustibles briquettes de BBa et TPo a été effectuée à partir d'une presse hydraulique électrique de marque PROETI munie d'un piston plein de diamètre externe 50 mm. Cette presse d'une capacité maximale de 300 kN provient du Laboratoire Eco-matériaux et Habit Durable de l'Institut 2iE et permet de produire une briquette par essai. Un système de démoulage constitué d'un support de fixation, une plaque métallique creuse et un cric bouteille hydraulique de capacité 3 tonnes a été conçu pour démouler les briquettes produites. L'ensemble de ces équipements utilisés pour la production des biocombustibles briquettes est présenté par la Figure 3.1.

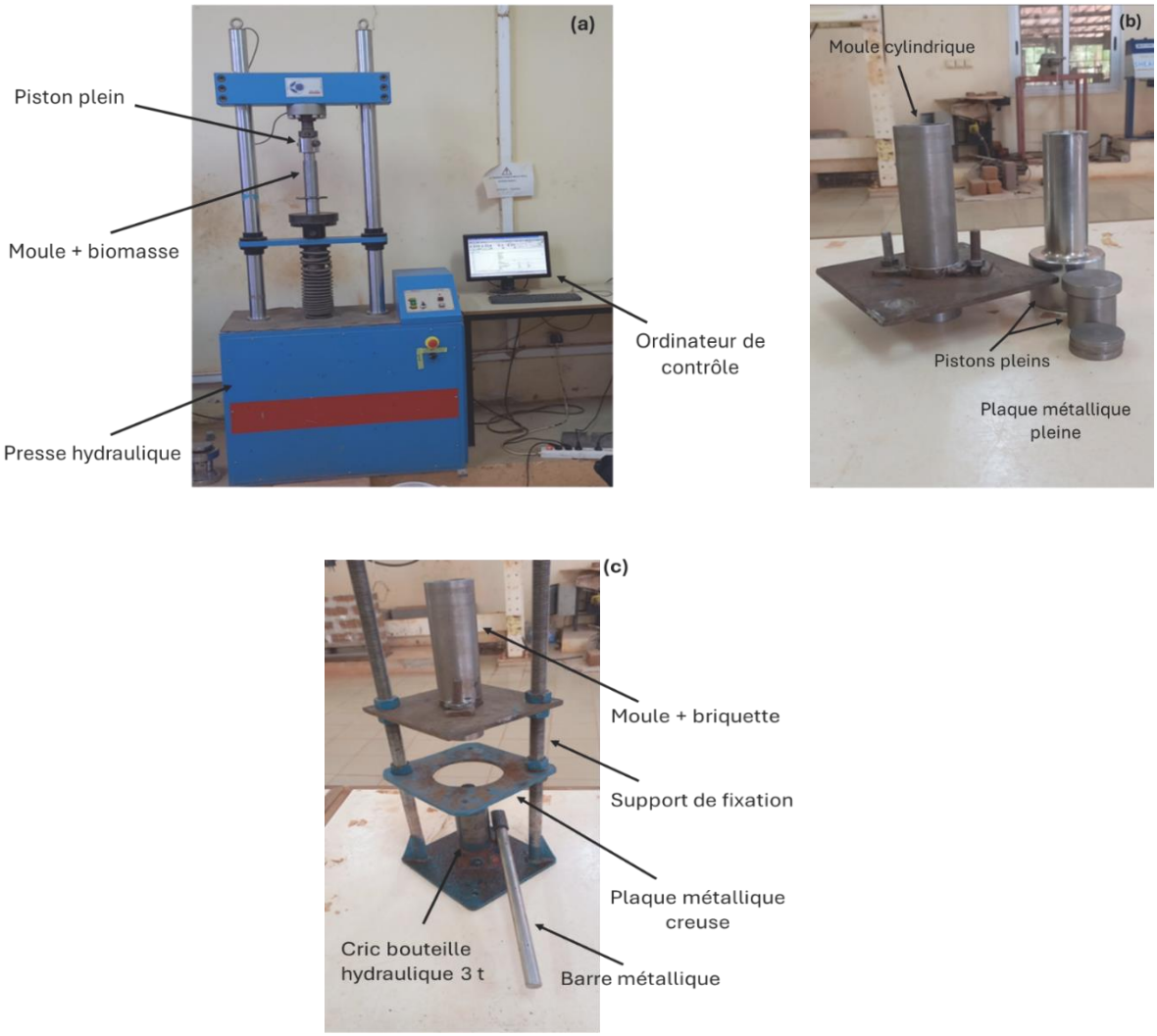


Figure 3.1. (a) Presse hydraulique, (b) Accessoires, (c) Système de démoulage

3.1.1.2 Protocole de production des biocombustibles briquettes

La biomasse telle que reçue a été broyée, tamisée à l'aide d'un tamis de maille 1,6 mm et stockée dans des sacs scellés. La production des biocombustibles briquettes a été réalisée par compactage de la biomasse dans un moule cylindrique. Une prise d'essai de 160 g d'échantillon de taux d'humidité préalablement déterminé selon le cas, a d'abord été mélangée avec une proportion d'eau ou à l'ensemble eau + liant (mélasse). Le mélange a ensuite été versé dans un moule cylindrique de diamètre interne 50 mm et de hauteur 200 mm. L'ensemble moule + mélange a enfin été placé sur la presse hydraulique et la biomasse a été pressée à la vitesse de 12,7 $mm.min^{-1}$ à une pression prédéfinie. Les briquettes obtenues ont été démoulées, pesées et séchées pendant trois semaines à la température ambiante à l'abri du soleil.

3.1.2 Méthode d'optimisation de la production des biocombustibles briquettes

L'optimisation de la densification de BBa et TPo a été réalisée en utilisant la méthodologie de surface de réponse. Les différents facteurs et réponses, le domaine expérimental et le plan d'expérimentation sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

3.1.2.1 Facteurs

Les facteurs du procédé sont les variables indépendantes qui sont supposées exercer une influence sur la densification de BBa et TPo. Leur choix a été fait sur la base des travaux antérieurs portants sur la densification de la biomasse disponibles dans la littérature [71,124,125] et en tenant compte du contexte de la présente étude. Ils ont été classés en deux catégories, à savoir les facteurs principaux et les facteurs secondaires.

- **Facteurs principaux**

Les facteurs principaux sont les paramètres dont les valeurs varient d'un niveau inférieur noté (-1) à un niveau supérieur noté (+1). Les niveaux de ces facteurs appelés variables d'entrée ont été fixés à partir de tests préliminaires et des connaissances acquises dans la littérature. Ce sont :

- La pression de compactage (MPa) ;
- Le taux d'humidité (%) ;
- Le ratio liant/biomasse ;
- Le temps de séjour (s).

- **Facteurs secondaires**

Les facteurs secondaires sont les paramètres dont les valeurs ont été fixées à une valeur déterminée pour chaque expérience. Il s'agit :

- Du diamètre des briquettes (50 mm) ;
- De la température du procédé : température ambiante ;
- Du type de liant (mélasse).

3.1.2.2 Domaine expérimental

Le domaine expérimental de la densification de BBa et TPo est présenté par le Tableau 3.1. Il a été obtenu en considérant les quatre facteurs principaux.

Tableau 3.1. Domaine expérimental

Facteurs codés	Désignation	Niveau bas (-1)	Niveau médian (0)	Niveau haut (+1)
A	Pression de compactage (MPa)	7	18,5	30
B	Humidité (%)	10	20	30
C	Rapport liant / biomasse	0	0,125	0,25
D	Temps de séjour (s)	0	150	300

3.1.2.3 Plan d'expérimentation

Dans la présente étude, le plan Box Behnken a été utilisé parmi tous les autres plans de surface de réponse par ce qu'il était le mieux adapté aux différents niveaux des facteurs décrits dans le Tableau 3.1. Le nombre d'expériences relatives à ce plan est donné par l'expression suivante :

$$N = 2f(f-1) + C_0 \qquad (3.1)$$

Où :

f : nombre de facteurs principaux

C_0 : nombre de points au centre

En considérant les quatre facteurs principaux et cinq points au centre, vingt-neuf essais étaient ainsi requis pour chaque échantillon. Le Tableau 3.2 présente le plan d'expérimentation obtenu à partir du domaine expérimental.

Tableau 3.2 Plan d'expérimentation

Essai	Pression de compactage	Humidité	Rapport liant/biomasse	Temps de séjour
	MPa	%	-	s
1	18,5	30	0	150
2	18,5	30	0,125	0
3	18,5	20	0,125	150
4	30	10	0,125	150
5	7	30	0,125	150
6	18,5	30	0,125	300
7	30	20	0	150
8	7	20	0,125	300
9	30	30	0,125	150
10	30	20	0,125	300
11	18,5	10	0,125	0
12	18,5	20	0,125	150
13	18,5	20	0,125	150
14	18,5	10	0,125	300
15	30	20	0,25	150
16	18,5	20	0,25	0
17	7	20	0	150
18	18,5	20	0,125	150
19	18,5	10	0	150
20	18,5	20	0,25	300
21	7	10	0,125	150
22	18,5	20	0	0
23	18,5	10	0,25	150
24	30	20	0,125	0
25	18,5	30	0,25	150
26	18,5	20	0	300
27	7	20	0,25	150
28	7	20	0,125	0
29	18,5	20	0,125	150

3.1.3 Réponses

Les réponses sont les variables dépendantes dont les valeurs sont mesurées pour chaque condition expérimentale. Dans la présente étude, le choix des réponses s'est fait dans le but de pouvoir évaluer à la fois les propriétés mécaniques et les performances thermiques des biocombustibles briquettes produites. Ces réponses sont : la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique.

3.1.3.1 Densité apparente

Elle est le rapport entre la masse et le volume du biocombustible briquette. La masse du biocombustible briquette a été déterminée à l'aide d'une balance de laboratoire de précision

0,0001 g. Le diamètre et la hauteur du biocombustible briquette ont quant à eux été déterminés à l'aide d'un pied à coulisse. La densité apparente a ensuite été calculée à partir de l'équation (3.2).

$$\rho = \frac{m_{briquette}}{\pi \frac{D^2}{4} H} \qquad (3.2)$$

Où :

ρ : Densité apparente, en ($kg.m^{-3}$)

m : Masse de la briquette, en (kg)

D : Diamètre de la briquette, en (m)

H : Hauteur de la briquette, en (m)

3.1.3.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression fait partie des critères de durabilité des biocombustibles briquettes [126] ; elle reflète leur capacité à résister à des contraintes qui leur sont imposées lors de leur manipulation, stockage ou transport. Elle a été déterminée à l'aide d'une presse mécanique de marque « CONTROLS » munie d'une charge maximale de 50 kN. La briquette a été placée entre deux plaques métalliques et la charge a été appliquée de façon axiale à la vitesse de 0,02 mm/s jusqu'à ce que celle-ci se fissure (ASTM D2166-85). La valeur de la résistance à la compression a été calculée en faisant le rapport entre la force maximale subie par la briquette et la surface de sa section transversale suivant l'équation (3.3) :

$$RC = \frac{F_{max}}{\pi r^2} \qquad (3.3)$$

Où :

RC : Résistance à la compression, en (kPa)

F_{max} : Force maximale subit par la briquette, en (kN)

r : Rayon de la briquette, en (mm)

3.1.3.3 Vitesse de décomposition thermique

La méthode appliquée pour déterminer la vitesse de décomposition thermique des biocombustibles briquettes est basée sur les travaux de Djomdi et al. [127] et Kuhe et al. [128]. Chaque briquette a d'abord été pesée puis introduite dans le four à moufle préalablement chauffé à 500 °C. Ce dernier a ensuite été fermé jusqu'à l'inflammation de la briquette (Figure

3.2). La combustion s'est ensuite poursuivie sans interruption jusqu'à la fin de l'inflammation de la briquette. La vitesse de décomposition thermique a ainsi été calculée à partir de l'équation (3.4) :

$$v = \frac{m_b - m_{imb}}{t_{déc}} \qquad (3.4)$$

Où :

v : Vitesse de décomposition thermique, en ($g.min^{-1}$)

m_b : Masse de la briquette, en (g)

m_{imb} : Masse des imbrulés, en (g)

$t_{déc}$: Temps de la décomposition thermique, en (min)

Figure 3.2 Test de combustion des briquettes dans le four à moufle

3.1.3.4 Densité énergétique

Elle représente la quantité d'énergie contenue dans 1 m^3 du biocombustible briquette. Elle a été calculée à partir de l'expression suivante :

$$DE = PCS \times \rho \qquad (3.5)$$

Où :

DE : Densité énergétique, en ($MJ.m^{-3}$)

PCS : Pouvoir calorifique supérieur, en ($MJ.kg^{-1}$)

ρ : Densité apparente, en ($kg.m^{-3}$)

3.1.4 Analyse statistique

L'analyse statistique des données a été effectuée en utilisant le logiciel Design Expert version 13. Le modèle polynomial quadratique et le modèle d'interaction 2FI (two factor interactions) ont respectivement été appliqués pour optimiser la densification de BBa et TPo. Les équations mathématiques de ces deux modèles sont présentées par les équations suivantes :

- Pour les boues de barattage :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{4} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{4} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{4} \beta_{ii} X_i^2 \qquad (3.6)$$

- Pour les tourteaux de presse :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{4} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{4} \beta_{ij} X_i X_j \qquad (3.7)$$

Où Y représente la réponse étudiée ; β_0 est une constante qui représente la moyenne des réponses ; β_i est le coefficient d'un terme linéaire ; β_{ij} est le coefficient d'un terme d'interaction et β_{ii} est le coefficient d'un terme quadratique. X_i et X_j sont les valeurs codées des facteurs i et j respectivement.

3.1.5 Caractérisation des briquettes optimisées de BBa et TPo

3.1.5.1 Analyses physicochimiques et pouvoir calorifique

Les analyses immédiates portant sur la détermination des taux d'humidité, de cendre, de matière volatile et de carbone fixe des biocombustibles briquettes optimisées de BBa et TPo ont été réalisées. Ensuite, les pouvoirs calorifiques supérieurs de celles-ci ont été déterminés. Ces différentes analyses ont été réalisées suivant les protocoles décrits dans le paragraphe 2.1.2.

3.1.6 Analyse thermique dans un foyer de cuisson amélioré

Le test d'ébullition de l'eau a permis de vérifier si les briquettes optimisées de BBa et TPo conviennent à un usage dans les foyers de cuisson domestiques rencontrés dans les pays d'Afrique sub-saharienne. La méthode utilisée est basée sur les travaux de Sawadogo et al. [129]. Une masse initiale de combustible a été pesée et introduite dans le foyer à combustion. Ensuite, une marmite initialement vide a été remplie aux 2/3 de son volume avec de l'eau (2 litres) puis cette dernière a été chauffée jusqu'à son point d'ébullition. A l'issu du test d'ébullition de l'eau, les paramètres suivants ont été déterminés :

3.1.6.1 Temps d'ébullition

Le temps d'ébullition (t_e) correspond au temps mis par l'eau pour atteindre son point d'ébullition. Il a été calculé suivant l'équation ci-après :

$$t_e = h_f - h_i \quad (3.8)$$

Où : t_e est le temps d'ébullition (min), h_i représente l'heure de démarrage du test et h_f est l'heure de fin du test.

3.1.6.2 Consommation de combustible

Elle représente la quantité totale de combustible consommée pour porter l'eau à ébullition. Elle a été calculée suivant l'équation ci-dessous :

$$C_c = m_{ic} - m_{imb} \quad (3.9)$$

Où : C_c représente la consommation de combustible (g), m_{ic} est la masse initiale de combustible (g) et m_{imb} est la masse totale des imbrûlés (g).

3.1.6.3 Puissance de feu

La puissance de feu correspond au rapport entre la quantité d'énergie consommée pour porter l'eau à ébullition et le temps mis pour atteindre cette ébullition. Elle est déterminée à travers l'équation suivante :

$$P_f = \frac{m_c \times PCI}{t_e} \quad (3.10)$$

Où : P_f représente la puissance de feu (W), m_c est la masse de combustible (kg), PCI est le pouvoir calorifique inférieur du combustible ($J.kg^{-1}$) et t_e est le temps mis pour atteindre l'ébullition de l'eau (s).

3.1.6.4 Consommation spécifique de combustible

La consommation spécifique de combustible représente la quantité d'énergie consommée par litre d'eau et par minute. Elle se calcule en faisant la différence entre l'équivalent de combustible sec utilisé moins la masse finale de combustible (imbrulés + charbon) divisée par la quantité d'eau pesée. Elle a été déterminée à partir de l'équation ci-après :

$$C_s = \frac{(m_{ic} - m_{fc}) \times (1 - \%\, H_c)}{(m_{ime} - m_{mv})} \quad (3.11)$$

Où : C_s est la consommation spécifique ($MJ.l^{-1}.min^{-1}$), m_{ic} représente la masse initiale de combustible (kg), m_{fc} est la masse finale de combustible (kg), % H_c est le taux d'humidité du combustible (%), m_{ime} est la masse initiale de la marmite et de l'eau (kg) et m_{mv} est la masse de la marmite vide (kg).

3.1.7 Microscopie électronique à balayage (MEB) / analyse EDX

L'effet de la densification de BBa et de TPo sur la morphologie des particules de surface et la macro-porosimétrie a été étudiée par la technique de la microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX). L'instrument utilisé, le ThermoFischer Phenom ProX Desktop SEM était également équipé d'un détecteur de spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie permettant de mesurer la composition chimique à la surface des échantillons. Les tensions d'accélération de 10 et 15 kV ont été utilisées pour les analyses MEB et EDX respectivement. Les échantillons ont été couverts par une fine pellicule d'or pour améliorer leur conductivité.

3.2 Résultats et discussions

3.2.1 Etude de la densification des boues de barattage (BBa) par la méthode de surface de réponse / plan Box-Behnken

3.2.1.1 Plan d'expériences Box-Behnken

La réalisation des 29 essais tels que décrits par le plan d'expérimentation a conduit à la production de biocombustibles briquettes de BBa de diverses qualités dont les diamètres étaient compris entre 4,8 à 5,5 cm et les hauteurs variaient de 8,5 à 11,3 cm (Figure 3.3).

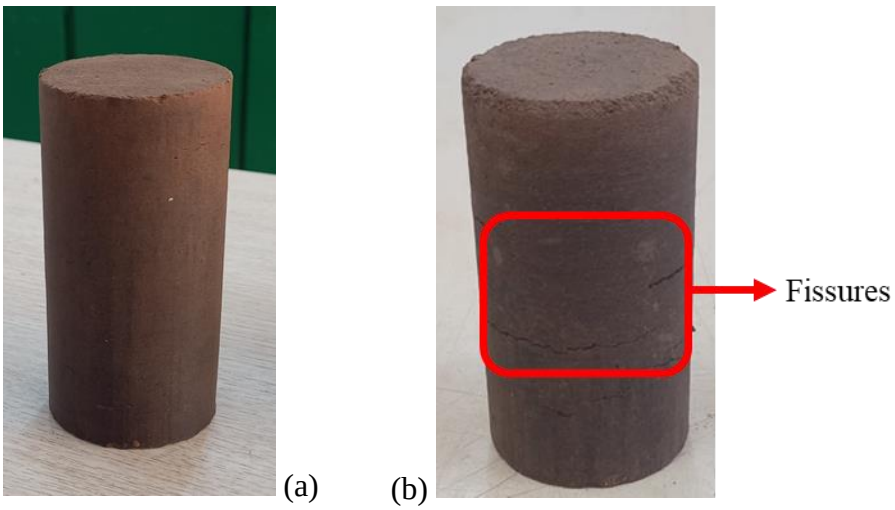


Figure 3.3. Biocombustibles briquettes de BBa (a) avec une bonne texture, (b) présentant des fissures

Pour chacun des biocombustibles briquettes de BBa produites, les réponses décrites précédemment ont été mesurées et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.3. Il a été observé que les quatre réponses étudiées sont sensibles aux variations des différents facteurs dans leurs domaines expérimentaux respectifs. La densité apparente varie d'une valeur minimale de 860,73 $kg.m^{-3}$ à une valeur maximale de 1056,24 $kg.m^{-3}$ correspondants respectivement aux essais 21 et 26. Les valeurs de la résistance à la compression sont quant à elles comprises entre 594,91 et 3769,89 kPa. La vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique ont des valeurs comprises entre 3,45 et 4,05 $g.min^{-1}$ puis 19 403,1 et 23 926,6 $MJ.m^{-3}$ respectivement. Une comparaison entre les réponses mesurées et celles estimées par le modèle polynomial quadratique (Tableau 3.3) a été effectuée afin d'évaluer l'adéquation de ce modèle. La Figure 3.4 montre le tracé des graphes d'adéquation du modèle polynomial quadratique pour les quatre réponses. Sur ces graphes, le nuage de points représente les valeurs d'une réponse Y donnée pour chaque ligne du plan d'expérimentation. L'analyse des graphes montre que le nuage de point est aligné sur la première bissectrice, c'est-à-dire la droite d'équation y=x. La qualité descriptive du modèle polynomial quadratique est donc bonne

pour chacune des quatre réponses ; les valeurs prédites (estimées) par le modèle sont proches de celles réellement mesurées (valeurs expérimentales) pour chaque réponse.

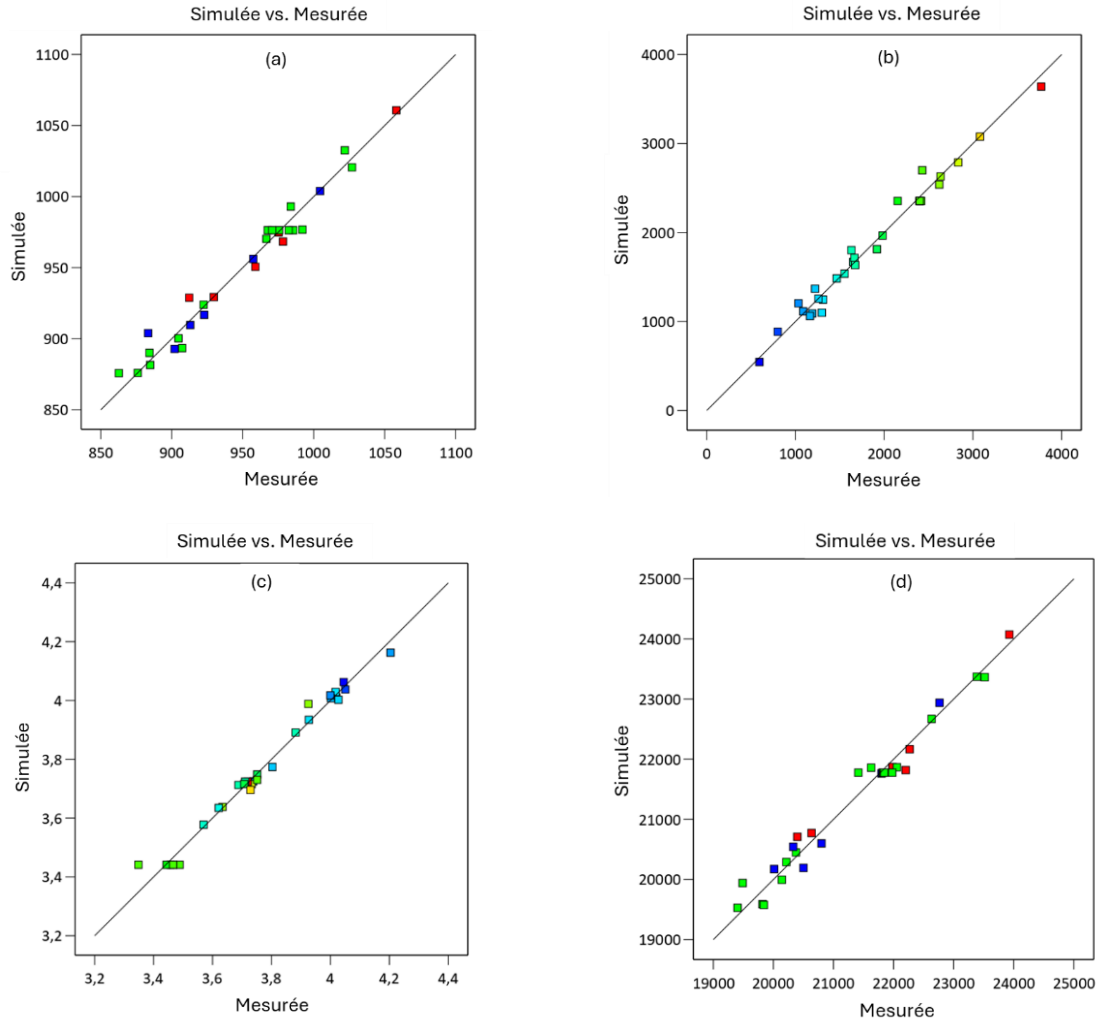


Figure 3.4. Graphes d'adéquation du modèle polynomial pour (a) la densité apparente, (b) la résistance à la compression, (c) la vitesse de décomposition thermique et (d) la densité énergétique

Tableau 3.3 Résultat du plan Box-Behnken appliqué à la densification de BBa

Essais	Facteurs (Variables indépendantes)				Réponses (Variables dépendantes)							
N°.	A	B	C	D	DA mesurée	DA simulée	RC mesurée	RC simulée	VDT mesurée	VDT simulée	DE mesurée	DE simulée
	MPa	%	-	s	$kg.m^{-3}$		kPa		$g.min^{-1}$		$MJ.m^{-3}$	
1	18,5	30	0	150	992,06	976,70	2635,89	2630,37	3,63	3,64	22055,80	21866,56
2	18,5	30	0,125	0	883,35	903,89	1464,41	1485,04	3,62	3,63	20330,00	20543,35
3	18,5	20	0,125	150	975,65	976,38	2152,44	2354,18	3,44	3,44	21413,10	21776,11
4	30	10	0,125	150	966,68	970,25	1187,92	1090,07	3,74	3,72	21626,50	21858,43
5	7	30	0,125	150	904,74	900,25	1553,13	1538,16	3,57	3,58	20216,00	20291,16
6	18,5	30	0,125	300	912,24	928,82	1630,82	1801,88	3,88	3,89	20398,40	20711,16
7	30	20	0	150	1021,87	1032,57	2429,24	2699,32	3,75	3,73	23385,90	23372,15
8	7	20	0,125	300	958,89	950,55	1981,77	1965,50	3,71	3,72	22202,10	21819,01
9	30	30	0,125	150	907,35	893,37	1297,95	1099,57	3,93	3,93	20141,30	19995,77
10	30	20	0,125	300	975,26	974,84	1917,80	1812,21	3,75	3,75	21982,00	21871,02
11	18,5	10	0,125	0	922,80	916,78	1259,63	1256,90	4,03	4,00	20800,90	20600,01
12	18,5	20	0,125	150	967,62	976,38	2396,30	2354,18	3,49	3,44	21828,50	21776,11
13	18,5	20	0,125	150	982,37	976,38	2418,47	2354,18	3,35	3,44	21816,20	21776,11
14	18,5	10	0,125	300	978,34	968,35	1220,82	1368,53	3,80	3,77	22268,30	22166,66
15	30	20	0,25	150	922,44	923,86	1033,46	1204,45	4,00	4,02	20375,80	20449,89
16	18,5	20	0,25	0	913,04	909,62	1650,45	1669,29	4,02	4,01	20013,40	20173,83
17	7	20	0	150	983,80	992,93	3079,17	3076,51	3,73	3,70	22633,30	22670,97
18	18,5	20	0,125	150	970,72	976,38	2400,87	2354,18	3,47	3,44	21845,50	21776,11
19	18,5	10	0	150	1026,92	1020,58	2620,84	2538,15	3,93	3,99	23516,70	23364,35
20	18,5	20	0,25	300	929,57	929,26	1311,55	1246,29	4,02	4,03	20636,10	20772,31
21	7	10	0,125	150	862,73	875,78	800,60	886,17	4,05	4,04	19488,00	19940,66
22	18,5	20	0	0	1004,48	1003,87	2834,32	2786,77	3,73	3,72	22766,40	22937,36
23	18,5	10	0,25	150	884,32	890,05	594,91	544,91	4,04	4,06	19820,00	19590,36
24	30	20	0,125	0	957,40	956,10	1673,18	1633,93	3,71	3,72	21798,80	21762,97
25	18,5	30	0,25	150	884,80	881,51	1087,01	1114,18	4,20	4,16	19842,50	19575,99
26	18,5	20	0	300	1058,24	1060,73	3769,89	3638,24	3,72	3,72	23926,60	24073,34
27	7	20	0,25	150	876,06	875,92	1163,69	1061,94	4,00	4,01	19403,10	19528,68
28	7	20	0,125	0	902,00	892,80	1665,25	1715,32	3,69	3,71	20500,60	20192,60
29	18,5	20	0,125	150	985,54	976,38	2402,85	2354,18	3,46	3,44	21977,20	21776,11

DA : densité apparente ; RC : résistance à la compression ; VDT : vitesse de décomposition thermique ; DE : densité énergétique

3.2.1.2 Analyse statistique du modèle polynomial quadratique

Le traitement des résultats du plan d'expérimentation a été faite en utilisant le logiciel Design Expert Version 13. La validation du modèle polynomial quadratique postulé pour chacune des réponses a été effectuée en considérant les paramètres statistiques suivants : les coefficients de détermination R^2, R^2 ajusté, R^2 prédit puis le F-value et le P-value du modèle et du manque d'ajustement. Les résultats des tests statistiques pour les quatre réponses étudiées sont présentés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Résultats statistiques d'ajustement du modèle polynomial quadratique

Réponse	R^2	R^2 Ajusté	R^2 prédit	Modèle p-value	Modèle F-value	Manque d'ajust. p-value	Manque d'ajust. F-value
DA	0,9697	0,9394	0,8391	< 0,0001	24,02	0,1269	3,36
RC	0,9794	0,9588	0,8952	< 0.0001	53,46	0,2452	2,11
VDT	0,9828	0,9657	0,9376	< 0.0001	119,22	0,7874	0,2539
DE	0,9722	0,9444	0,8574	< 0.0001	17,62	0,2213	2,28

L'analyse des résultats montre que pour toutes les réponses, le modèle polynomial quadratique est significatif, p-value < 0,0001 et le manque d'ajustement est non significatif (p-value > 0,05). Les valeurs des coefficients de détermination R^2, R^2 ajusté et R^2 prédit sont toutes proches de 1 et les différences entre R^2 ajusté et R^2 prédit sont inférieures à 0,2. En moyenne, seulement ~ 3 % des observations ne sont pas expliquées par ce modèle pour toutes les réponses. Le modèle polynomial quadratique est donc robuste, significatif, précis et peut être utilisé pour connaitre les valeurs de chaque réponse dans le domaine expérimental étudié. Les différentes équations mathématiques qui en découlent en tenant compte de tous les termes codés s'écrivent comme suit :

$$Densité\ apparente = 976{,}38 + 21{,}90A - 13{,}10B - 56{,}43C + 19{,}12D - 25{,}34AB + 2{,}08AC - 9{,}76AD + 8{,}84BC - 6{,}66BD - 9{,}31CD - 26{,}18A^2 - 40{,}29B^2 + 6{,}12C^2 - 6{,}63D^2 \quad (3.12)$$

$$Résistance\ à\ la\ compression = 2354{,}18 - 58{,}67A + 165{,}37B - 877{,}36C + 107{,}12D - 160{,}62AB + 129{,}93AC - 17{,}97AD + 119{,}26BC + 51{,}30BD - 318{,}62CD - 448{,}52A^2 - 752{,}17B^2 + 104{,}89C^2 - 123{,}93D^2 \quad (3.13)$$

$$Vitesse\ de\ décomposition\ thermique = 3{,}44 + 0{,}01A - 0{,}06B + 0{,}15C + 0{,}01D + 0{,}17AB - 0{,}01AC + 0{,}01AD + 0{,}11BC + 0{,}12BD + 0{,}003CD + 0{,}14A^2 + 0{,}24B^2 + 0{,}28C^2 + 0{,}15D^2 \quad (3.14)$$

$$Densité\ énergétique = 21776{,}11 + 405{,}60A - 378{,}04 - 1516{,}14C + 433{,}62D - 553{,}29AB + 55{,}01AC - 379{,}59AD + 370{,}85BC - 349{,}71BD - 134{,}37CD - 424{,}25A^2 - 830{,}36B^2 + 153{,}56C^2 + 59{,}54D^2 \quad (3.15)$$

3.2.1.3 Analyse statistique des coefficients et effets des facteurs de densification de BBa sur les réponses

Le but de l'analyse statistique des coefficients est de vérifier s'il existe parmi eux (coefficients) certains qui n'exercent pas d'influence majeure, en d'autres termes s'ils ne présentent pas d'effet significatif sur chacune des réponses. Les résultats relatifs à l'estimation des coefficients et à l'analyse de la variance (ANOVA) sont présentés par le Tableau 3.5. Il est à noter qu'un coefficient est qualifié d' « influent» lorsque le p-value qui lui est associé est inférieur à 5 % (p-value < 0,05).

- **Cas de la réponse : densité apparente (DA)**

L'analyse du Tableau 3.5 montre que seuls les coefficients β_1, β_2, β_3, β_4, β_{12}, β_1^2 et β_2^2 sont influents pour la densité apparente. Par ailleurs, l'effet des différents facteurs a été étudié plus en détail en se servant de l'analyse graphique. Le diagramme de Pareto de la Figure 3.5 (a) montre que le ratio liant/biomasse a l'effet le plus important (effet normalisé ~ 16) suivi de la pression de compactage, du temps de séjour et du taux d'humidité. Seule l'interaction entre la pression de compactage et le taux d'humidité (AB) exerce un effet significatif sur la densité apparente. Cette interaction est présentée par la courbe d'interaction 3D de la Figure 3.9 (a). Il a été observé que lorsqu'on diminue la pression de comptage jusqu'à sa plus faible valeur (7 MPa) et qu'on augmente simultanément le taux d'humidité de la biomasse, il s'ensuit un léger accroissement de la densité apparente. Cependant, à partir de 18,5 MPa, une augmentation du taux d'humidité provoque l'effet contraire, c'est-à-dire, une diminution de la densité apparente. Des observations similaires ont été faites par Mainkaew et al. [124] sur les briquettes de bouse d'éléphant. Les résultats ont également montré que le temps de séjour (facteur D) exerce un effet positif sur la densité apparente. Cela s'explique par le fait que plus la biomasse

dure dans le moule sous une pression donnée, plus son volume diminue, ce qui entraîne une augmentation de sa densité apparente. En outre, l'utilisation de la mélasse comme liant a eu un effet négatif sur la densité apparente des briquettes de BBa. Des résultats similaires ont été rapportés par Wakchaure et Mani [130] ; Ces auteurs ont constaté une diminution de la densité apparente des briquettes de sciure de bois et de tige de moutarde lorsque le taux de mélasse augmentait dans la formulation.

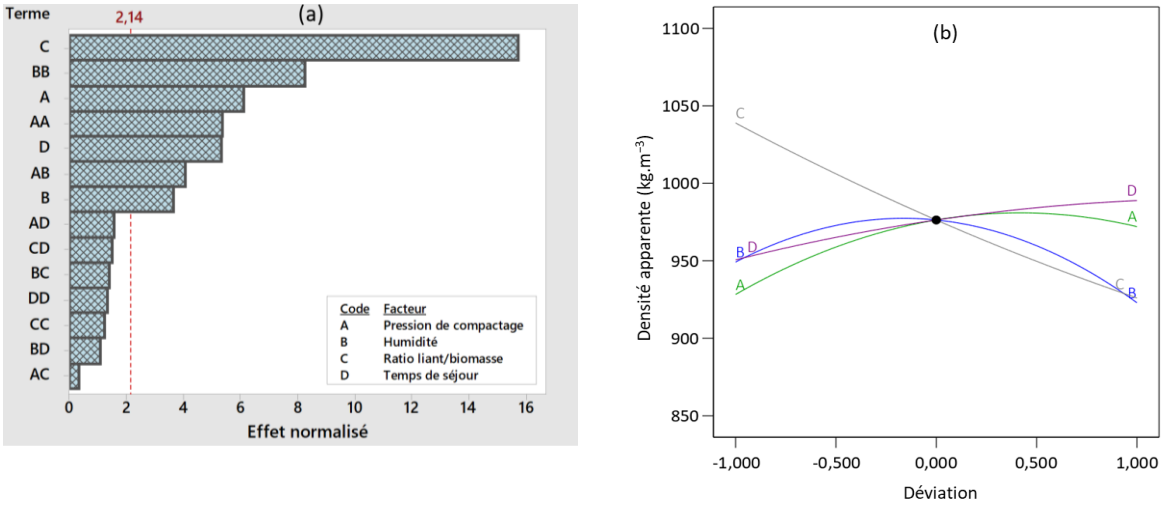


Figure 3.5. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la densité apparente de BBa suivant le PSR-BB

❖ **Cas de la réponse : résistance à la compression (RC)**

L'analyse de la variance (Tableau 3.5) concernant la résistance à la compression montre que les coefficients β_2, β_3 et β_4 des facteurs principaux, humidité (facteur B), ratio liant/biomasse (facteur C) et temps de séjours (facteur D) sont influents. Relativement aux interactions, seul le coefficient lié à celle entre le ratio liant/biomasse et le temps de séjour (β_{34}) exerce une influence significative sur cette réponse. L'analyse de la courbe d'interaction 3D de la Figure 3.9 (b) montre que lorsqu'on diminue le taux de liant tout en augmentant celui du temps de séjour, la valeur de la résistance à la compression croît. L'effet contraire est observé quand on diminue simultanément les deux facteurs. De plus, lorsque le taux de liant est à sa valeur minimale (0 %), toute augmentation du temps de séjour entraine une forte augmentation de la RC. Cependant, quand le taux de liant est à sa valeur maximale (25 %), une augmentation du temps de séjour n'a presque pas d'effet sur la RC. Il a également été observé que l'interaction entre la pression de compactage et le taux d'humidité exerce un effet moyen sur cette réponse. Le diagramme de Pareto de la Figure 3.6 (a) montre que le facteur « ratio liant/biomasse » a l'effet le plus important (effet normalisé ~ 20). Il est suivi par le taux d'humidité et le temps de séjours. En outre, l'analyse de la courbe de perturbation de la Figure 3.6 (b) révèle qu'une augmentation de

la pression de compactage et du taux d'humidité jusqu'à leurs valeurs médianes, c'est-à-dire 18,5 kPa et 20 % respectivement entraine un accroissement de la valeur de la résistance à la compression. Mais, au-delà de ces valeurs médianes, ces deux facteurs ont un impact négatif sur la résistance à la compression ; une augmentation ultérieure de leurs valeurs provoque une diminution de celle de la résistance à la compression. En effet, les forces de liaison des molécules d'eau renforcent les liaisons entre les particules individuelles des briquettes jusqu'à un certain niveau. Cependant, une augmentation ultérieure du taux d'humidité provoque une perturbation de ces liaisons inter-particulaires. Des observations similaires ont été faites par Fasina [131] lors de la densification des coques d'arachide. Ce résultat montre également que pour produire des biocombustibles briquettes de BBa ayant de bonnes RC, il n'est pas désirable d'appliquer une très grande pression de compactage ; Tanui et al. [132] ont obtenu des résultats similaires avec les briquettes de charbon de sciure de bois. Par ailleurs, le ratio liant/biomasse impacte négativement la résistance à la compression. Ce résultat signifie qu'au fur et à mesure qu'on augmente le taux de liant dans la formulation, la résistance à la compression de la briquette diminue. Cela est dû au fait que la granulométrie de BBa, dominée par des particules de petites tailles (entre 400 et 63 µm) ainsi que sa teneur élevée en lignine (37,33 %) entrainent un meilleur compactage de cette biomasse sans apport de liant. En effet, l'action combinée de la lignine et de l'humidité crée un liant intrinsèque qui favorise la résistance mécanique des briquettes produites [133,134]. Le temps de séjour quant à lui influence positivement la résistance à la compression, son augmentation entraine également une augmentation de la valeur de cette réponse.

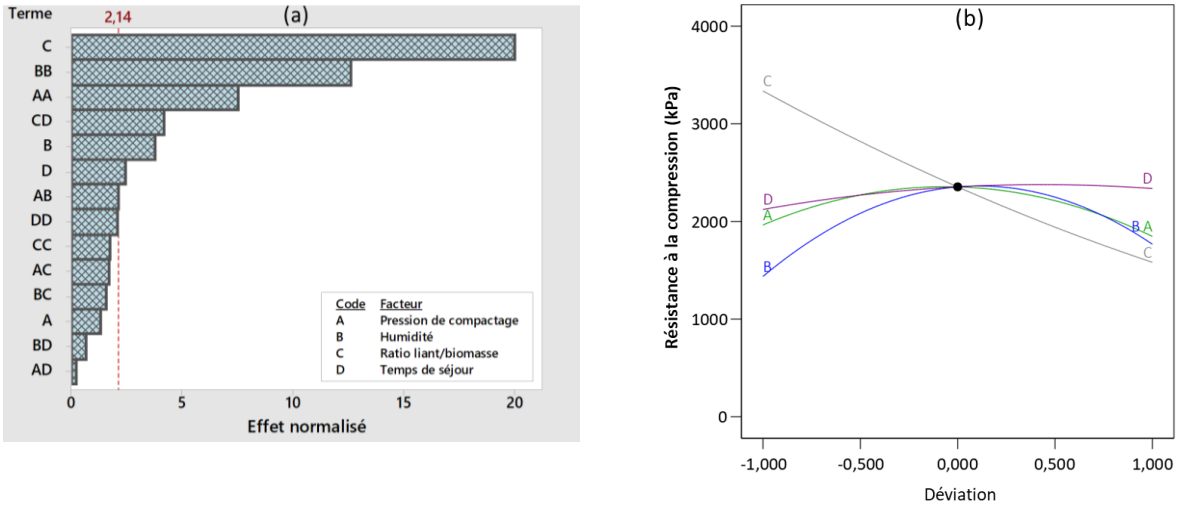


Figure 3.6. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la résistance à la compression de BBa suivant le PSR-BB

❖ Cas de la réponse : vitesse de décomposition thermique (VDT)

Les résultats relatifs à l'analyse de la variance présentés par le Tableau 3.5 indiquent que les coefficients β_2 et β_3 des facteurs principaux humidité et ratio liant/biomasse respectivement sont influents. Trois interactions à savoir, pression de compactage-taux d'humidité (AB), taux d'humidité-ratio liant/biomasse (BC) et taux d'humidité-temps de séjour (BD) exercent également des influences significatives sur la vitesse de décomposition thermique des briquettes de BBa. Tous les termes quadratiques β_1^2, β_2^2, β_3^2 et β_4^2 sont influents. Le diagramme de Pareto de la Figure 3.7 (a) montre que le ratio liant/biomasse est le facteur principal qui exerce l'effet le plus important (effet normalisé ~ 18) sur la vitesse de décomposition thermique suivi du taux d'humidité (effet normalisé ~ 5). La courbe de perturbation de la Figure 3.7 (b) indique que lorsque le taux d'humidité passe de 10 à 22 %, la vitesse de décomposition thermique diminue et passe d'environ 3,74 g.min^{-1} à près de 3,43 g.min^{-1} ; elle augmente légèrement par la suite sans pour autant atteindre sa valeur initiale. Ce résultat montre qu'un fort taux d'humidité de BBa exerce un effet négatif sur la vitesse de décomposition thermique des briquettes produites. Djomdi et al. [127] ont fait des observations similaires dans leur étude sur les pellettes de balles de riz. Par ailleurs, le ratio liant/biomasse a globalement un effet positif sur la VDT ; plus ce ratio est élevé, plus grande est la VDT. Ainsi, les briquettes produites avec un taux de liant élevé pourraient brûler plus rapidement que celles produites sans liant. Ce résultat s'explique par le fort taux de matière volatile (~81 %) de la mélasse utilisée comme liant dans cette étude. Cette observation implique que si les briquettes sont produites sans liant, une faible quantité sera nécessaire pour la cuisson comparativement aux briquettes produites avec du liant [128].

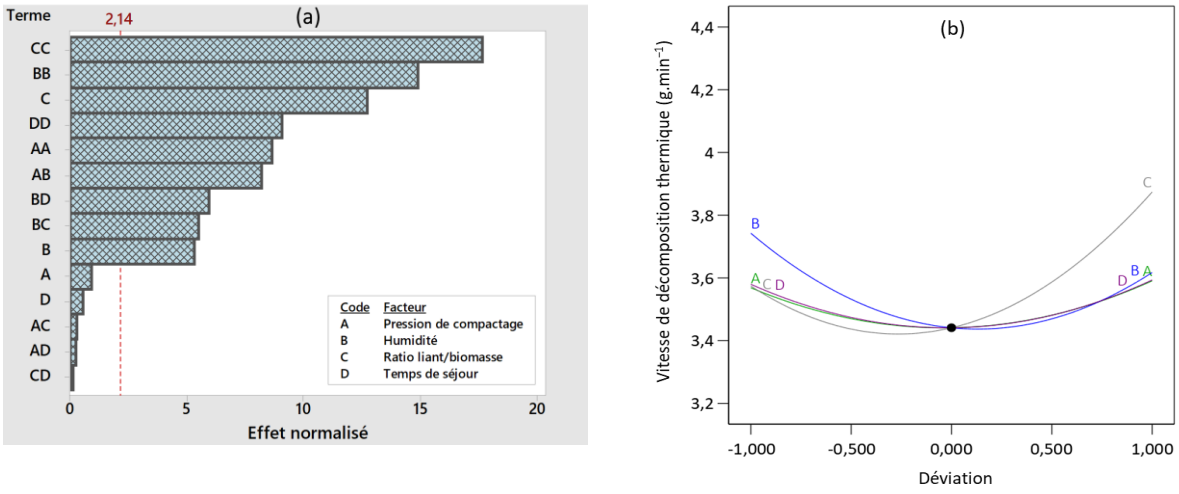


Figure 3.7. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la vitesse de décomposition thermique de BBa suivant le PSR-BB

❖ Cas de la réponse : densité énergétique (DE)

L'analyse de la variance du Tableau 3.5 relative à la densité énergétique montre que tous les coefficients β_1, β_2, β_3 et β_4 des facteurs principaux (A, B, C et D) sont significatifs. De plus, seuls les coefficients des interactions pression de compactage-ratio liant/biomasse (AC) et ratio liant/biomasse-temps de séjour (CD) sont non significatifs. Les coefficients β_1^2 et β_2^2 liés aux termes quadratiques A^2 et B^2 sont significatifs. Le diagramme de Pareto (Figure 3.8 (a)) des effets normalisés montre que parmi les facteurs principaux, le ratio liant/biomasse est celui qui a l'effet le plus important (effet normalisé ~ 18) sur la densité énergétique. Il est suivi par le temps de séjour, la pression de compactage et l'humidité. Par ailleurs, le taux d'humidité et le ratio liant/biomasse exercent des influences négatives sur la densité énergétique. Le ratio liant/biomasse est le facteur qui a l'influence négative la plus importante sur la densité énergétique. En d'autres termes, plus le taux de liant dans les briquettes de BBa est élevé, plus faible est leurs quantités d'énergie par unité de volume (Figure 3.8 (b)). Ce résultat s'explique par le fait que le pouvoir calorifique supérieur de la mélasse (PCS=17,5 MJ/kg) est faible comparativement à celui de BBa (PCS=27,70 MJ/kg).

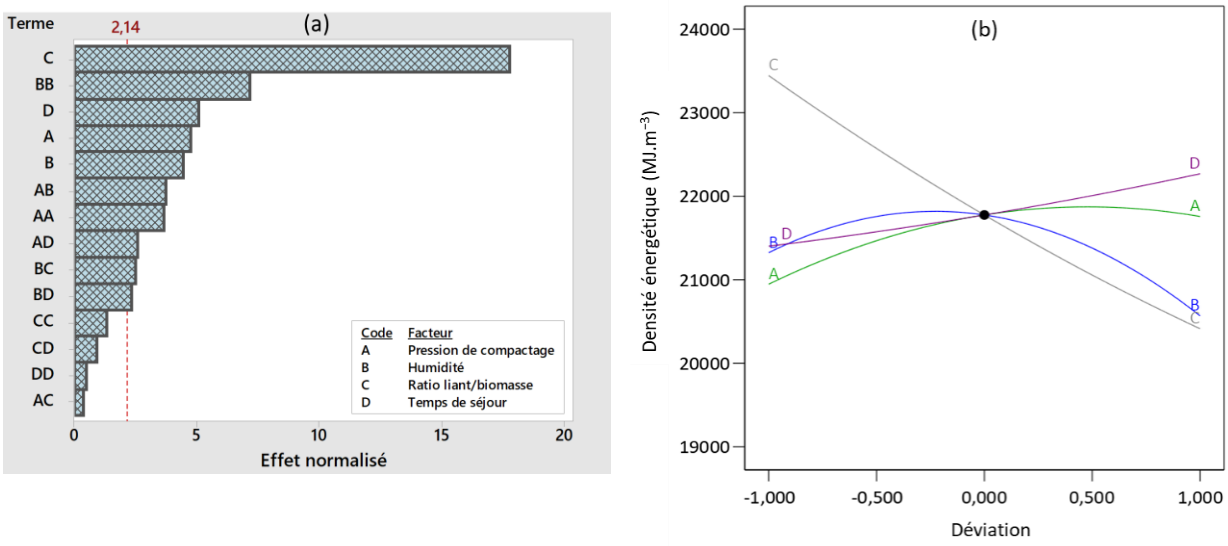
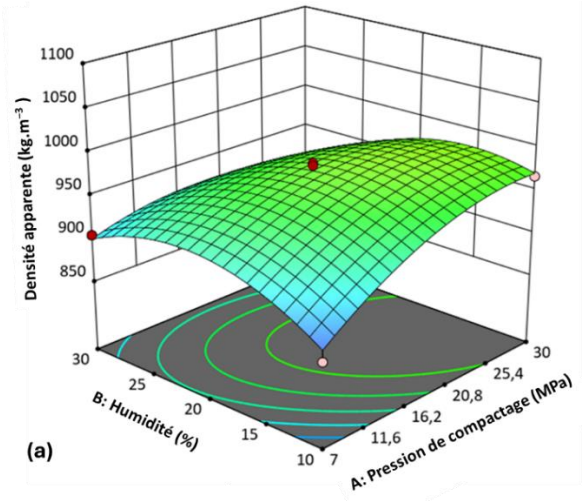
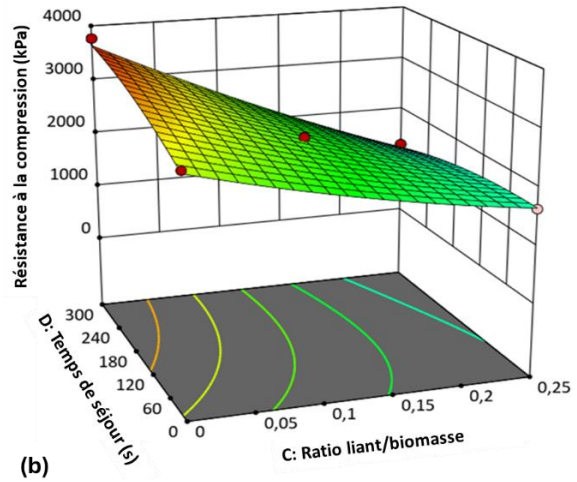


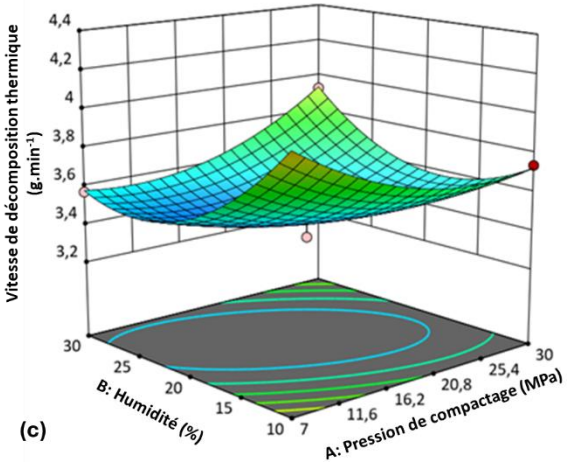
Figure 3.8. (a) Diagramme de Pareto et (b) courbe de perturbation de la densité énergétique de BBa suivant le PSR-BB

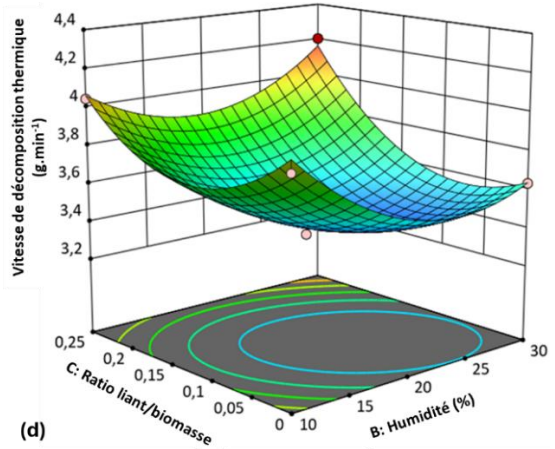
Tableau 3.5. Estimation des coefficients et analyse de la variance (ANOVA)

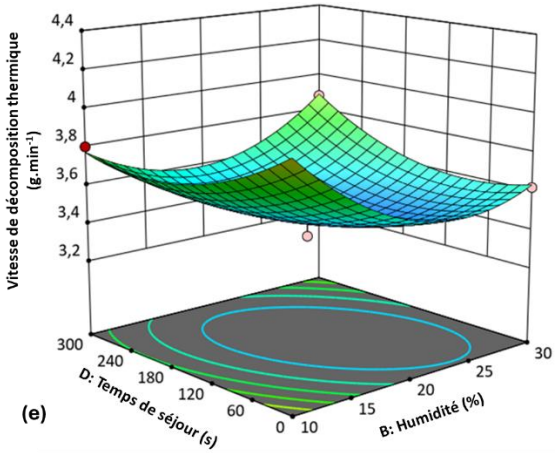
Réponses	Densité apparente			Résistance à la compression			Vitesse de décomposition thermique			Densité énergétique		
Coeff./Facteur	Coeff.	Ecart-type	p-value	Coeff.	Ecart-type	p-value	Coeff.	Ecart-type	p-value	Coeff.	Ecart-type	p-value
β_0	976,38	5,55		2354,18	67,77		3,44	0,0182		21776,11	131,84	
β_1 / A	**21,90**	3,58	< 0,0001	-58,67	43,74	0,2012	0,0110	0,0118	0,3651	**405,60**	85,10	0,0003
β_2 /B	**-13,10**	3,58	0,0026	**165,37**	43,74	0,0020	**-0,0626**	0,0118	0,0001	**-378,04**	85,10	0,0006
β_3 / C	**-56,43**	3,58	< 0,0001	**-877,36**	43,74	< 0,0001	**0,1498**	0,0118	< 0,0001	**-1516,14**	85,10	< 0,0001
β_4 / D	**19,12**	3,58	0,0001	**107,12**	43,74	0,0281	0,0069	0,0118	0,5687	**433,62**	85,10	0,0002
β_{12} / AB	**-25,34**	6,20	0,0011	-160,62	75,76	0,0524	**0,1673**	0,0204	< 0,0001	**-553,29**	147,41	0,0021
β_{13} / AC	2,08	6,20	0,7429	129,93	75,76	0,1084	-0,0061	0,0204	0,7673	55,01	147,41	0,7146
β_{14} / AD	-9,76	6,20	0,1381	-17,97	75,76	0,8159	0,0052	0,0204	0,8012	**-379,59**	147,41	0,0220
β_{23} / BC	8,84	6,20	0,1762	119,26	75,76	0,1378	**0,1126**	0,0204	< 0,0001	**370,85**	147,41	0,0247
β_{24} / BD	-6,66	6,20	0,3011	51,30	75,76	0,5094	**0,1212**	0,0204	< 0,0001	**-349,71**	147,41	0,0325
β_{34} / CD	-9,31	6,20	0,1557	**-318,62**	75,76	0,0009	0,0027	0,0204	0,8952	-134,37	147,41	0,3774
β_1^2 / A²	**-26,18**	4,87	< 0,0001	**-448,52**	59,50	< 0,0001	**0,1385**	0,0160	< 0,0001	**-424,25**	115,75	0,0025
β_2^2 / B²	**-40,29**	4,87	< 0,0001	**-752,17**	59,50	< 0,0001	**0,2388**	0,0160	< 0,0001	**-830,36**	115,75	< 0,0001
β_3^2 / C²	6,12	4,87	0,2296	104,89	59,50	0,0997	**0,2829**	0,0160	< 0,0001	153,56	115,75	0,2059
β_4^2 / D²	-6,63	4,87	0,1951	-123,93	59,50	0,0561	**0,1455**	0,0160	< 0,0001	59,54	115,75	0,6150

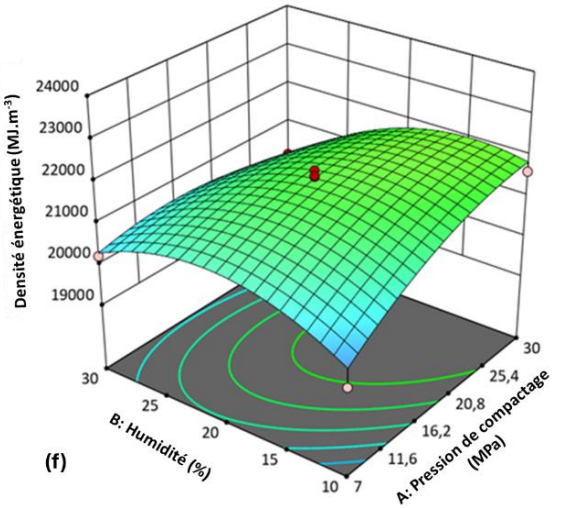

Densité apparente (kg.m⁻³)
1100
1050
1000
950
900
850
30
25
20
15
10
B: Humidité (%)
7
11,6
16,2
20,8
25,4
30
A: Pression de compactage (MPa)
(a)


Résistance à la compression (kPa)
4000
3000
2000
1000
0
300
240
180
120
60
0
D: Temps de séjour (s)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
C: Ratio liant/biomasse
(b)


Vitesse de décomposition thermique (g.min⁻¹)
4,4
4,2
4
3,8
3,6
3,4
3,2
30
25
20
15
10
B: Humidité (%)
7
11,6
16,2
20,8
25,4
30
A: Pression de compactage (MPa)
(c)


Vitesse de décomposition thermique (g.min⁻¹)
4,4
4,2
4
3,8
3,6
3,4
3,2
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
C: Ratio liant/biomasse
10
15
20
25
30
B: Humidité (%)
(d)


Vitesse de décomposition thermique (g.min⁻¹)
4,4
4,2
4
3,8
3,6
3,4
3,2
300
240
180
120
60
0
D: Temps de séjour (s)
10
15
20
25
30
B: Humidité (%)
(e)


Densité énergétique (MJ.m⁻³)
24000
23000
22000
21000
20000
19000
30
25
20
15
10
B: Humidité (%)
7
11,6
16,2
20,8
25,4
30
A: Pression de compactage (MPa)
(f)

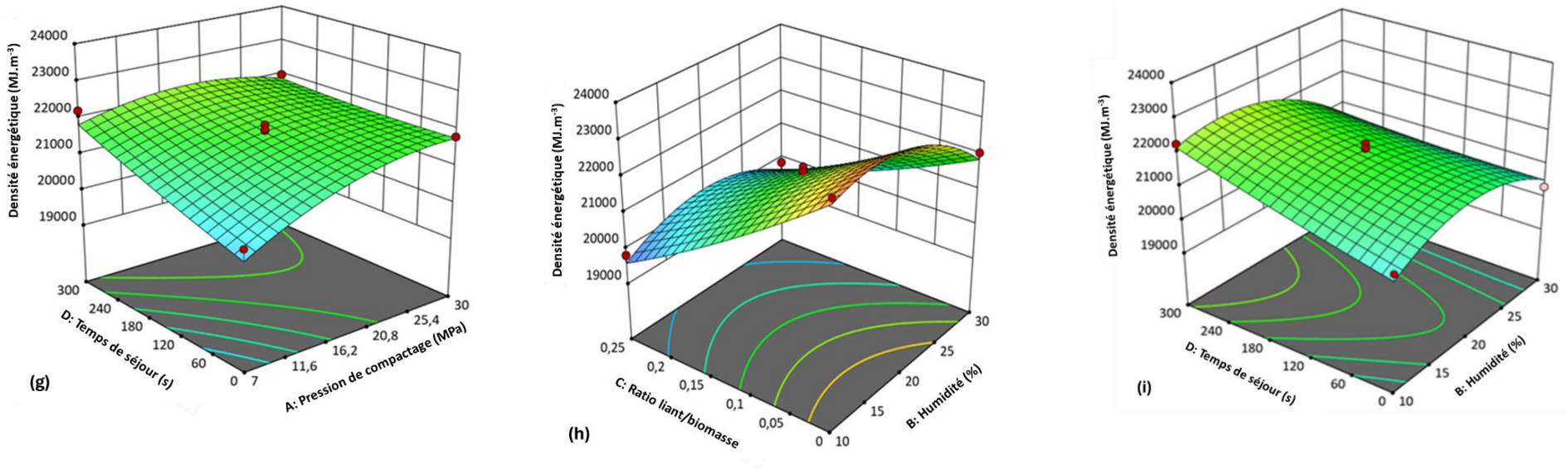


Figure 3.9. Courbes d'interactions 3D de la densification de BBa

3.2.2 Etude de la densification des tourteaux de presse (TPo) par la méthode de surface de réponse / plan Box-Behnken

3.2.2.1 Plan d'expériences Box-Behnken

La réalisation des 29 essais tels que présentés par le plan d'expérimentation en utilisant TPo a permis de produire des biocombustibles briquettes de qualités variables dont les diamètres variaient entre 4,9 et 5,4 cm puis les hauteurs étaient comprises entre 8,4 et 11,1 cm (Figure 3.10).

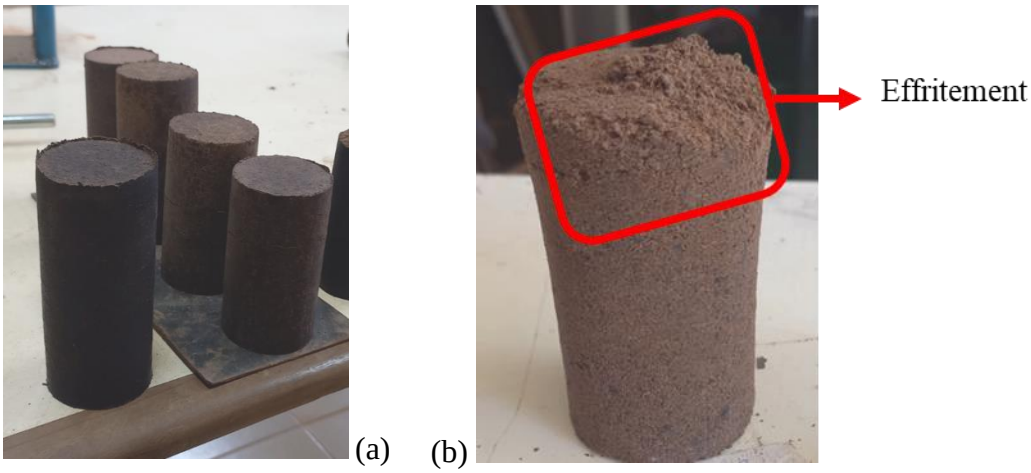


Figure 3.10. Biocombustibles briquettes de TPo (a) avec de bonnes textures, (b) présentant des effritements

Les réponses décrites précédemment à savoir, la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique ont été mesurées pour chaque biocombustible briquette de TPo produit. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.6. L'analyse de ces résultats montre que les quatre réponses étudiées sont sensibles aux variations des facteurs dans leurs différents domaines expérimentaux. Les valeurs de la densité apparente des briquettes de TPo obtenues sont comprises entre 880,57 et 1129,52 $kg.m^{-3}$. La résistance à la compression varie de 127,83 à 1340,80 kPa. La vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique ont des valeurs comprises entre 2,10 et 5,80 $g.min^{-1}$ puis 19324,40 et 25720,40 $MJ.m^{-3}$ respectivement. L'ajustement des différents modèles par le logiciel Design Expert version 13 indique que le modèle linéaire d'interaction (''two factor interactions'' (2FI)) s'ajuste le mieux avec les données expérimentales. Ainsi, l'adéquation de ce modèle a d'abord été évaluée par comparaison des valeurs des réponses expérimentales et celles estimées (Tableau 3.6). Les graphes d'adéquation obtenus pour les quatre réponses étudiées sont présentés par la Figure 3.11. L'analyse de ces graphes montre que le nuage de points est aligné sur la première bissectrice (droite d'équation y=x). Le modèle 2FI a donc une

bonne qualité descriptive ; les valeurs prédites (valeurs estimées) par ce modèle sont proches de celles réellement mesurées (valeurs expérimentales) pour chaque réponse.

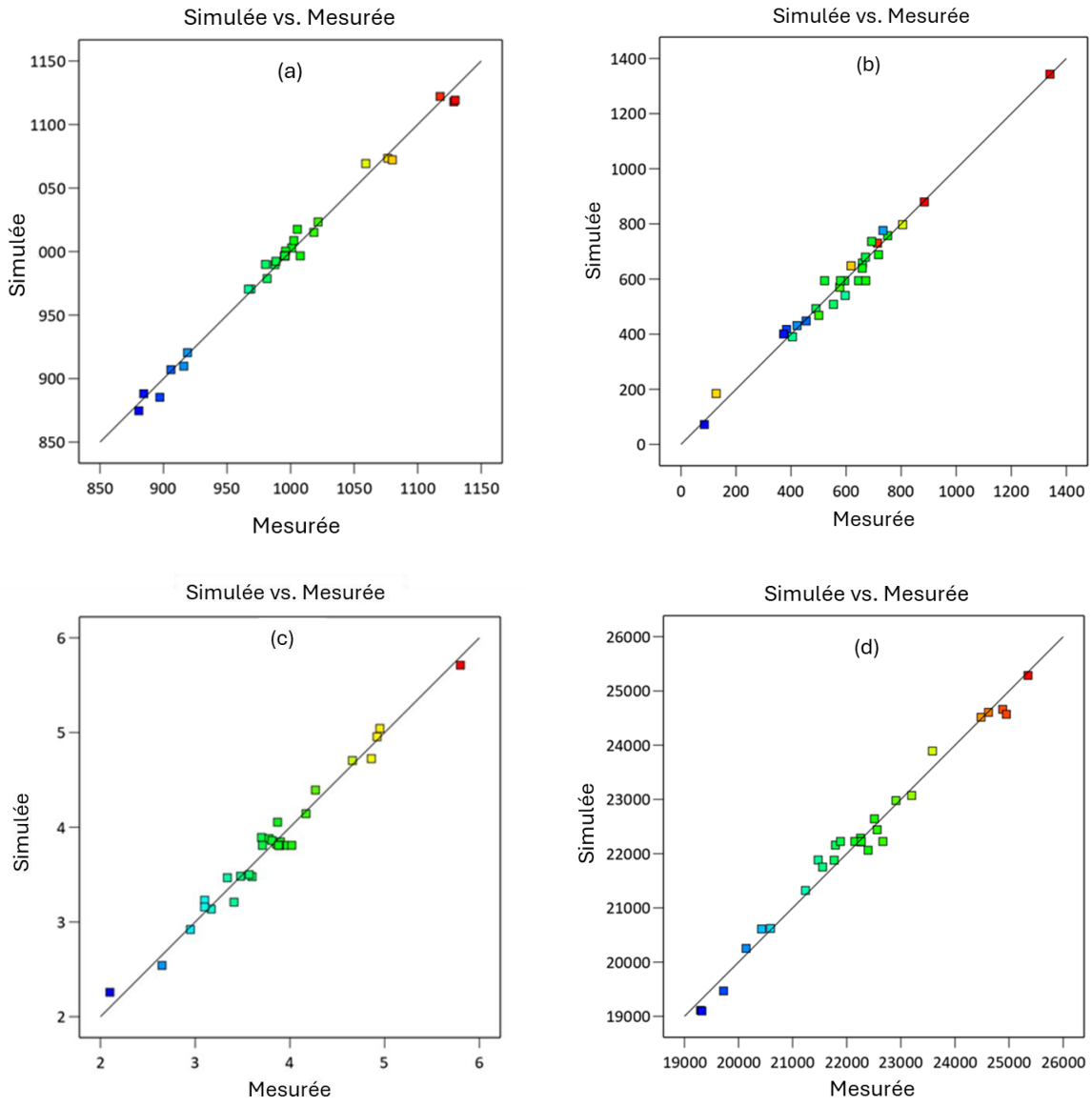


Figure 3.11. Graphes d'adéquation du modèle 2FI pour (a) la densité apparente, (b) la résistance à la compression, (c) la vitesse de décomposition thermique et (d) la densité énergétique

Tableau 3.6. Résultats du plan Box-Behnken appliqué à la densification de TPo

Essais	Facteurs (Variables indépendantes)				Réponses (Variables dépendantes)							
N°.	A	B	C	D	DA mesurée	DA simulée	RC mesurée	RC simulée	VDT mesurée	VDT simulée	DE mesurée	DE simulée
	MPa	%	-	s	$kg.m^{-3}$		kPa		$g.min^{-1}$		$MJ.m^{-3}$	
1	7	30	0,125	150	915,94	909,80	421,68	431,17	3,70	3,89	20425,52	20610,87
2	18,5	20	0,125	150	995,74	996,62	645,14	594,03	3,71	3,81	22148,44	22224,52
3	18,5	10	0,125	300	1129,52	1119,17	884,34	879,75	3,10	3,16	24619,90	24606,47
4	18,5	20	0,25	300	1000,91	1002,90	750,88	757,34	4,95	5,04	21767,23	21879,85
5	18,5	30	0	150	918,88	920,41	734,12	776,08	3,17	3,14	20590,48	20620,56
6	30	20	0,25	150	988,44	992,30	670,10	679,18	4,27	4,39	21236,80	21321,33
7	18,5	20	0,125	150	995,47	996,62	579,45	594,03	3,88	3,81	21883,66	22224,52
8	18,5	20	0	0	968,75	970,54	404,84	390,46	4,86	4,72	21790,34	22157,07
9	7	20	0	150	981,55	978,74	490,32	492,44	3,57	3,50	22394,52	22062,72
10	18,5	30	0,25	150	880,57	874,70	84,92	72,32	5,80	5,71	19324,40	19100,35
11	30	20	0,125	300	1005,32	1017,51	658,44	639,36	3,86	3,82	22511,35	22641,47
12	7	20	0,125	0	966,83	970,38	596,64	540,37	3,78	3,88	22254,96	22286,15
13	7	10	0,125	150	1059,20	1069,26	805,20	797,45	3,34	3,47	23584,19	23892,60
14	18,5	20	0	300	1021,63	1023,30	576,86	570,27	2,10	2,26	22909,88	22978,94
15	30	20	0,125	0	980,30	989,90	554,01	508,12	3,87	4,05	21554,41	21753,14
16	30	10	0,125	150	1117,68	1122,10	713,83	730,26	2,95	2,92	25349,45	25284,57
17	18,5	20	0,125	150	995,28	996,62	522,08	594,03	3,94	3,81	22265,04	22224,52
18	18,5	20	0,25	0	987,62	989,73	659,37	658,03	3,41	3,21	21471,95	21882,23
19	18,5	10	0,125	0	1080,08	1072,19	617,93	647,95	3,10	3,23	24950,40	24570,70
20	18,5	20	0,125	150	995,34	996,62	594,47	594,03	3,89	3,81	22268,10	22224,52
21	18,5	10	0,25	150	1128,46	1117,94	1340,80	1343,05	2,65	2,54	24882,78	24661,72
22	18,5	30	0,125	300	905,80	907,02	454,83	447,86	4,17	4,14	20139,69	20252,31
23	18,5	20	0,125	150	1007,62	996,62	671,20	594,03	4,02	3,81	22668,92	22224,52
24	7	20	0,25	150	996,05	1000,33	692,54	736,18	3,81	3,86	22561,98	22440,75
25	18,5	30	0,125	0	884,41	888,08	372,91	400,54	4,66	4,70	19722,25	19468,60
26	30	20	0	150	1018,33	1015,10	500,74	468,30	3,48	3,48	23199,32	23073,29
27	30	30	0,125	150	897,09	885,30	383,55	417,22	4,92	4,96	19298,00	19110,05
28	7	20	0,125	300	1002,56	1008,69	717,71	688,25	3,60	3,48	22254,72	22217,31
29	18,5	10	0	150	1076,54	1073,43	127,83	184,65	3,90	3,85	24482,38	24515,44

DA : densité apparente ; RC : résistance à la compression ; VDT : vitesse de décomposition thermique ; DE : densité énergétique

3.2.2.2 Analyse statistique du modèle 2FI

La validation du modèle 2FI par rapport à chacune des quatre réponses étudiées a été effectuée à travers une évaluation des paramètres statistiques tels que les coefficients de détermination R^2, R^2 ajusté, R^2 prédit puis le F-value et le P-value du modèle et du manque d'ajustement. Les résultats statistiques de l'ajustement de ce modèle pour chacune des quatre réponses étudiées sont présentés dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7. Résultats statistiques d'ajustement du modèle 2FI

Réponse	R^2	R^2 Ajusté	R^2 prédit	Modèle p-value	Modèle F-value	Manque d'ajust. p-value	Manque d'ajust. F-value
DA	0,9912	0,9863	0,9730	< 0,0001	12,40	0,2036	2,42
RC	0,9781	0,9660	0,9487	< 0.0001	81,70	0,9146	0,3916
VDT	0,9772	0,9646	0,9362	< 0.0001	76,55	0,3246	1,69
DE	0,9821	0,9721	0,9502	< 0.0001	9,97	0,6048	0,9100

L'analyse des résultats montre que le modèle 2FI est significatif (p-value < 0,0001) pour toutes les réponses et le manque d'ajustement est non significatif (p-value > 0,05). Les valeurs des coefficients de détermination R^2, R^2 ajusté et R^2 prédit sont toutes proches de 1 et les différences entre R^2 ajusté et R^2 prédit sont inférieures à 0,2. En moyenne, le modèle explique les observations relatives aux quatre réponses avec une précision d'environ 98 %. Le modèle 2FI est donc robuste, significatif et précis. Il permet ainsi de décrire correctement les variations des résultats d'essais pour chacune des quatre réponses. D'après ces résultats statistiques, le modèle est validé pour les quatre réponses étudiées. Les différentes équations mathématiques qui en découlent en tenant compte de tous les termes codés s'écrivent comme suit :

$$Densité\ apparente = 996{,}62 + 7{,}08A - 99{,}07B - 0{,}30C + 16{,}48D - 19{,}33AB - 11{,}10AC - 2{,}68AD - 22{,}56BC - 7{,}01BD - 9{,}90CD \quad (3.16)$$

$$Résistance\ à\ la\ compression = 594{,}03 - 20{,}29A - 169{,}83B + 113{,}66C + 69{,}78D + 13{,}31AB - 8{,}22AC - 4{,}16AD - 465{,}54BC - 46{,}12BD - 20{,}13CD \quad (3.17)$$

$$Vitesse\ de\ décomposition\ thermique = 3{,}81 + 0{,}13A + 0{,}62B + 0{,}32C - 0{,}16D + 0{,}40AB + 0{,}14AC + 0{,}04AD + 0{,}97BC - 0{,}12BD + 1{,}08CD \quad (3.18)$$

$$Densité\ énergétique = 22224{,}52 - 27{,}21A - 2364{,}06B - 343{,}48C + 204{,}87D - 723{,}20AB - 532{,}50AC + 239{,}29AD - 416{,}62BC + 186{,}99BD - 206{,}06CD \quad (3.19)$$

3.2.2.3 Analyse statistique des coefficients et effets des facteurs de densification de TPo sur les réponses

Les résultats de l'estimation des coefficients et de l'analyse de la variance (ANOVA) pour chacune des quatre réponses sont présentés dans le Tableau 3.8. Les coefficients influents sont ceux qui sont significatifs, c'est-à dire ceux dont p-value < 0,05.

❖ **Cas de la réponse : densité apparente (DA)**

L'analyse du Tableau 3.8 montre que les coefficients β_1, β_2, β_4, β_{12}, β_{13}, β_{23} et β_{34} sont influents pour la densité apparente. L'effet des différents facteurs sur la densité apparente a été étudié plus en détail en se servant de l'analyse graphique (diagramme de Pareto et droite de Henry).

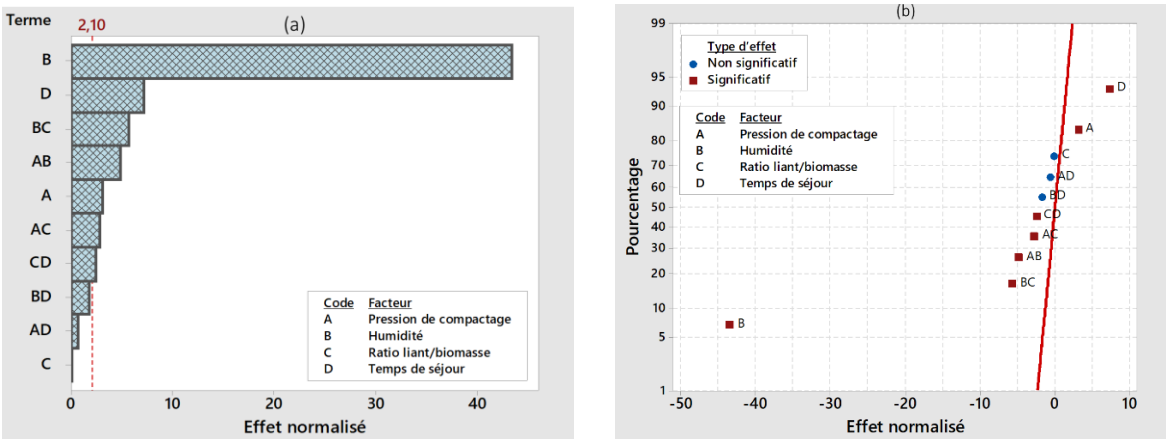


Figure 3.12. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la densité apparente de TPo suivant le PSR-BB

Le diagramme de Pareto de la Figure 3.12 (a) montre que le taux d'humidité (facteur B) exerce l'effet le plus important sur la densité apparente suivi du temps de séjour (facteur D) et de la pression de compactage (facteur A). Les effets des interactions humidité-ratio liant/biomasse (BC), pression de compactage-humidité (AB), pression de compactage-ratio liant/biomasse (AC) et ratio liant/biomasse-temps de séjour (CD) sont également significatifs. En outre, tous les facteurs dont les termes se retrouvent sur le côté droit de la droite de Henry ont des effets positifs tandis que ceux dont les termes sont à gauche ont des effets négatifs sur la réponse. Ainsi, l'analyse de la Figure 3.12 (b) montre que la pression de compactage et le temps de séjour ont des effets positifs sur la densité apparente ; plus leurs valeurs sont élevées, plus

grande est la valeur de la densité apparente. Le taux d'humidité quant à lui exerce un effet négatif très important sur cette réponse. Ces résultats indiquent que pour produire des biocombustibles briquettes de TPo ayant une forte densité apparente, il faut maintenir l'échantillon brut pendant un certain temps dans le moule sous une pression donnée.

❖ **Cas de la réponse : résistance à la compression (RC)**

Le tableau de l'estimation des coefficients et de l'analyse de la variance (Tableau 3.8) montre que les termes liés aux coefficients β_2, β_3, β_4, β_{23} et β_{24} sont influents. L'analyse graphique (diagramme de Pareto (a)) de la Figure 3.13 montre que le taux d'humidité exerce l'effet le plus important sur la résistance à la compression suivie par le ratio liant/biomasse et le temps de séjour. Les interactions humidité-ratio liant/biomasse (BC) et humidité-temps de séjour (BD) exercent également des influences significatives sur la réponse. La courbe d'interaction 3D de la Figure 3.16 indique que lorsque le taux d'humidité de TPo est entre 10 et 20 %, la RC de la briquette produite augmente avec le ratio liant/biomasse ; mais au-delà de 20 % de taux d'humidité, la RC diminue quand on augmente le ratio liant/biomasse. En effet, la mélasse contenant ~ 23 % d'humidité, un apport important d'eau supplémentaire dans la formulation fragilise la briquette puisque les molécules d'eau laissent des vides au cours du séchage. En outre, la droite de Henry de la Figure 3.13(b) montre que le ratio liant/biomasse et le temps de séjour ont des effets positifs sur la réponse. Lorsque leurs valeurs passent du niveau inférieur au niveau supérieur, la valeur de la résistance à la compression augmente.

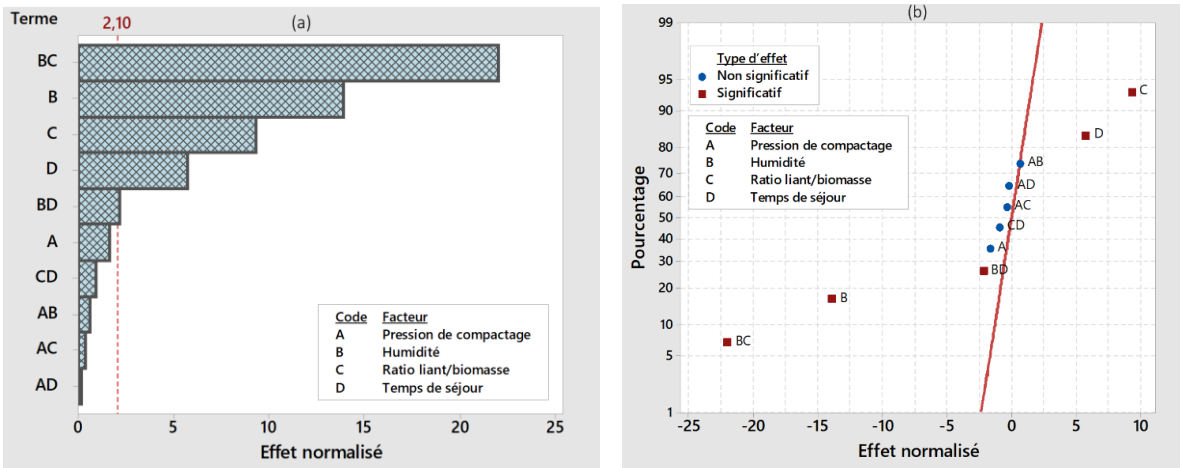


Figure 3.13. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la résistance à la compression de TPo suivant le PSR-BB

❖ Cas de la réponse : vitesse de décomposition thermique (VDT)

L'analyse du Tableau 3.8 montre que les termes liés aux coefficients β_1, β_2, β_3, β_4, β_{12}, β_{23} et β_{34} sont significatifs contrairement à ceux des coefficients β_{13}, β_{14} et β_{24}. Le diagramme de Pareto des effets normalisés de la Figure 3.14 (a) montre que le taux d'humidité est le facteur qui exerce l'effet le plus important sur la vitesse de décomposition thermique des briquettes de TPo suivi du ratio liant/biomasse, du temps de séjour et de la pression de compactage. Les interactions ratio liant/biomasse-temps de séjour (CD), humidité-ratio liant/biomasse (BC) et pression de compactage-humidité (AB) exercent également des influences importantes sur la réponse. On observe à partir de la courbe d'interaction 3D des facteurs C et D (Figure 3.16 (i)) que lorsque le ratio liant/biomasse est élevé, la vitesse de décomposition thermique des briquettes de TPo augmente avec le temps de séjour ; l'effet de ce dernier est quasiment nul quand le ratio liant biomasse est faible. Ce résultat est dû au fait qu'une partie de la mélasse sort à la surface de la briquette lorsque le taux de liant est élevé et que la biomasse reste longtemps dans le moule sous pression. L'analyse de la droite de Henry de la Figure 3.14 (b) montre que les facteurs A, B et C ont des effets positifs sur la vitesse de décomposition thermique ; une augmentation de leurs valeurs conduit à un accroissement de cette réponse.

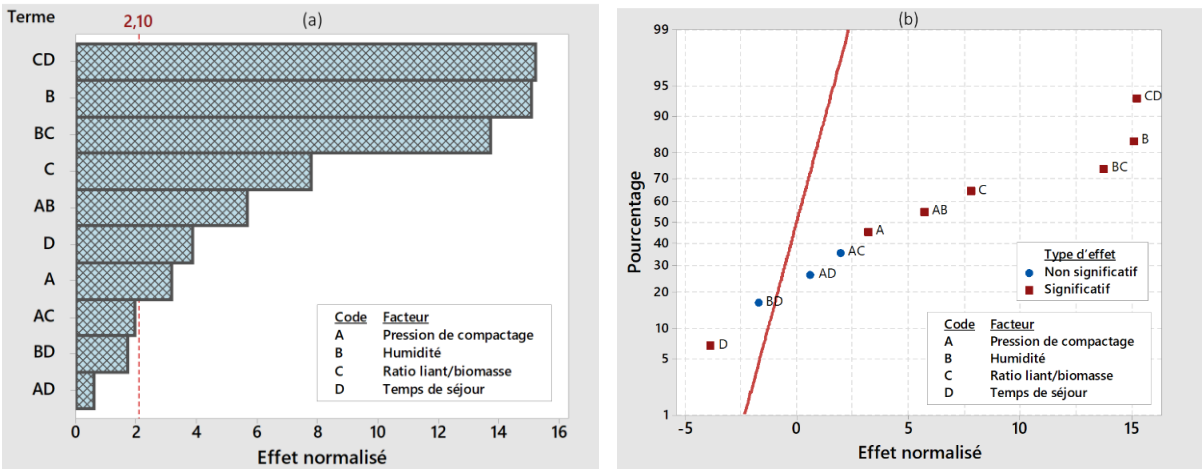


Figure 3.14. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la vitesse de décomposition thermique de TPo suivant le PSR-BB

❖ Cas de la réponse : densité énergétique (DE)

Le résultat de l'analyse de la variance (Tableau 3.8) montre que les termes significatifs sont ceux dont les coefficients sont β_2, β_3, β_4, β_{12}, β_{13} et β_{23}. L'analyse du diagramme de Pareto de la Figure 3.15 (a) montre que le taux d'humidité a l'effet principal le plus important suivi du ratio liant-biomasse et du temps de séjour. Les interactions pression de compactage-humidité

(AB), pression de compactage-ratio liant/biomasse (AC) et humidité-ratio liant/biomasse (BC) ont également des effets importants sur la réponse. La droite de Henry (Figure 3.15 (b)) montre que le taux d'humidité a un effet négatif considérable sur la densité énergétique ; lorsque sa valeur croît de 10 à 30 %, la densité énergétique diminue et passe de ~24 685 MJ.m^{-3} à ~19 895 MJ.m^{-3}. Cette significative influence négative du taux d'humidité est due au fait qu'il réduit à la fois le pouvoir calorifique de TPo et la densité apparente des briquettes de TPo produites. Par ailleurs, le ratio liant/biomasse a un effet négatif moyen sur la densité énergétique ; lorsque sa valeur passe de 10 à 25 %, la densité énergétique des briquettes baisse de ~22 633 MJ.m^{-3} à ~21 947 MJ.m^{-3}. Cette légère diminution de la densité énergétique est due au faible pouvoir calorifique du liant de densification utilisé (PCS mélasse = 17,5 MJ.kg^{-1}) comparativement à celui de TPo (PCS = 23,12 MJ.kg^{-1}).

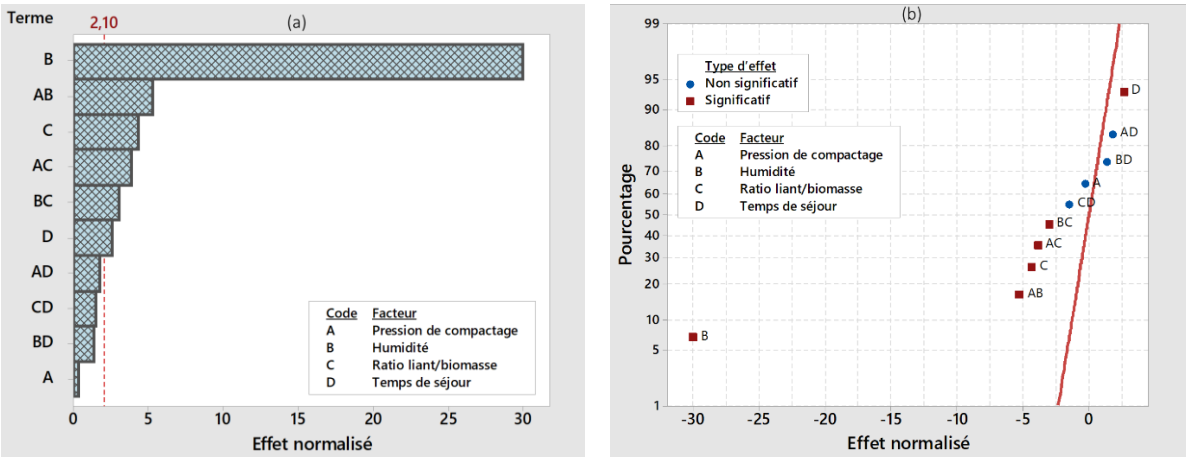
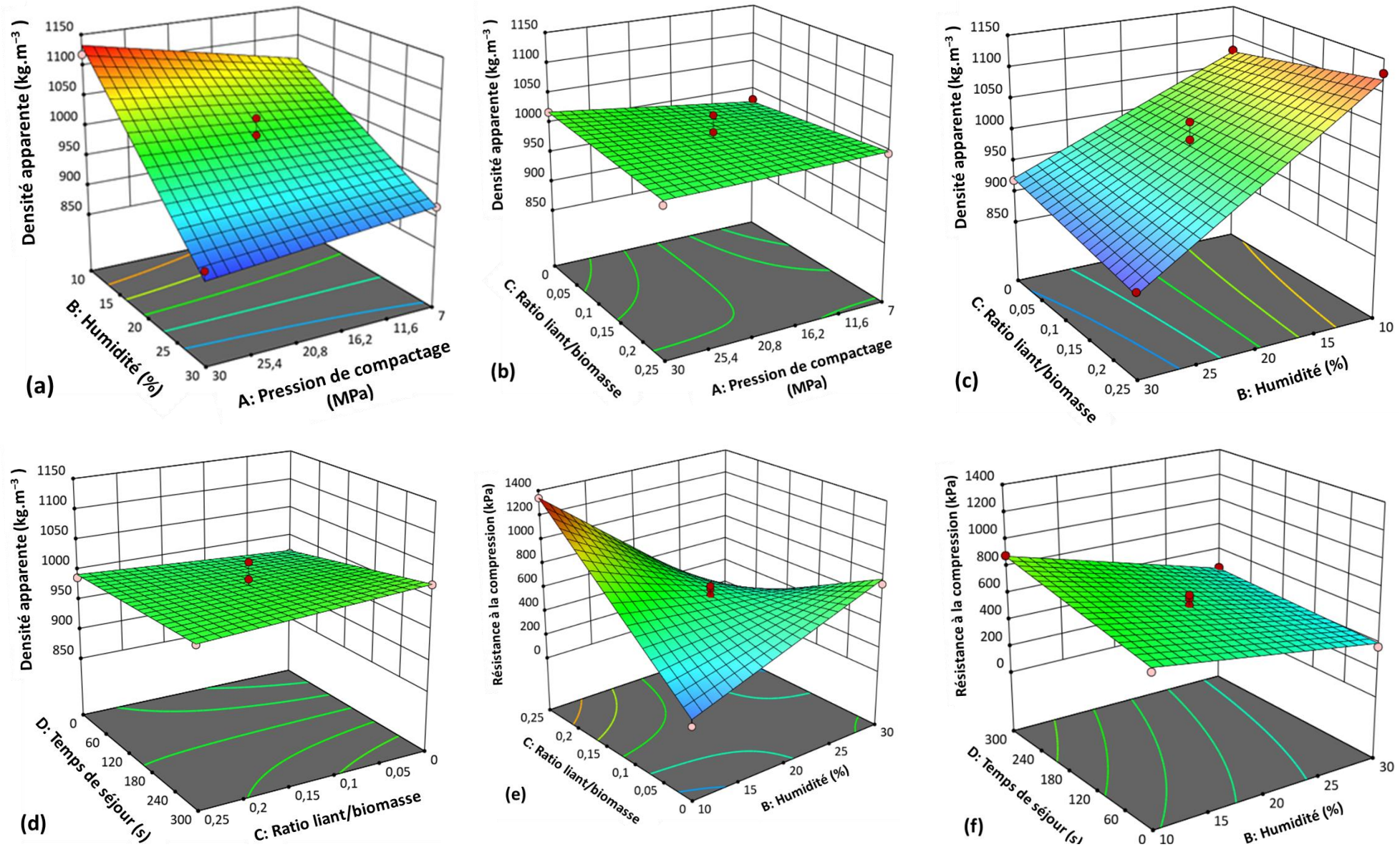


Figure 3.15. (a) Diagramme de Pareto et (b) droite de Henry de la densité énergétique des briquettes de TPo suivant le PSR-BB

Tableau 3.8. Estimation des coefficients et analyse de la variance (ANOVA)

Réponses	Densité apparente			Résistance à la compression			Vitesse de décomposition thermique			Densité énergétique		
Coeff./Facteur	Coeff.	Ecart-type	p-value	Coeff.	Ecart-type	p-value	Coeff.	Ecart-type	p-value	Coeff.	Ecart-type	p-value
β_0	996,62	1,47		594,03	7,86		3,81	0,0262		22224,52	50,69	
β_1 / A	**7,08**	2,28	0,0061	-20,29	12,22	0,1142	0,1292	0,0408	0,0054	-27,21	78,80	0,7338
β_2 /B	**-99,07**	2,28	< 0.0001	**-169,83**	12,22	< 0.0001	0,6150	0,0408	< 0.0001	-2364,06	78,80	< 0.0001
β_3 / C	-0,3017	2,28	0,8962	**113,66**	12,22	< 0.0001	0,3175	0,0408	< 0.0001	-343,48	78,80	0,0004
β_4 / D	**16,48**	2,28	< 0.0001	**69,78**	12,22	< 0.0001	-0,1583	0,0408	0,0011	204,87	78,80	0,0181
β_{12} / AB	**-19,33**	3,95	0,0001	13,31	21,16	0,5372	**0,4025**	0,0707	< 0.0001	**-723,20**	136,49	< 0.0001
β_{13} / AC	**-11,10**	3,95	0,0116	-8,22	21,16	0,7024	0,1375	0,0707	0,0675	**-532,50**	136,49	0,0010
β_{14} / AD	-2,68	3,95	0,5063	-4,16	21,16	0,8463	0,0425	0,0707	0,5551	239,29	136,49	0,0966
β_{23} / BC	**-22,56**	3,95	< 0.0001	**-465,54**	21,16	< 0.0001	**0,9700**	0,0707	< 0.0001	**-416,62**	136,49	0,0069
β_{24} / BD	-7,01	3,95	0,0927	**-46,12**	21,16	0,0428	-0,1225	0,0707	0,1001	186,99	136,49	0,1875
β_{34} / CD	**-9,90**	3,95	0,0220	-20,13	21,16	0,3542	**1,08**	0,0707	< 0.0001	-206,06	136,49	0,1485


Densité apparente (kg.m⁻³)
1150
1100
1050
1000
950
900
850
B: Humidité (%)
10
15
20
25
30
A: Pression de compactage (MPa)
30
25,4
20,8
16,2
11,6
7
(a)
C: Ratio liant/biomasse
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
(b)
(c)
Résistance à la compression (kPa)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
D: Temps de séjour (s)
0
60
120
180
240
300
(d)
(e)
(f)

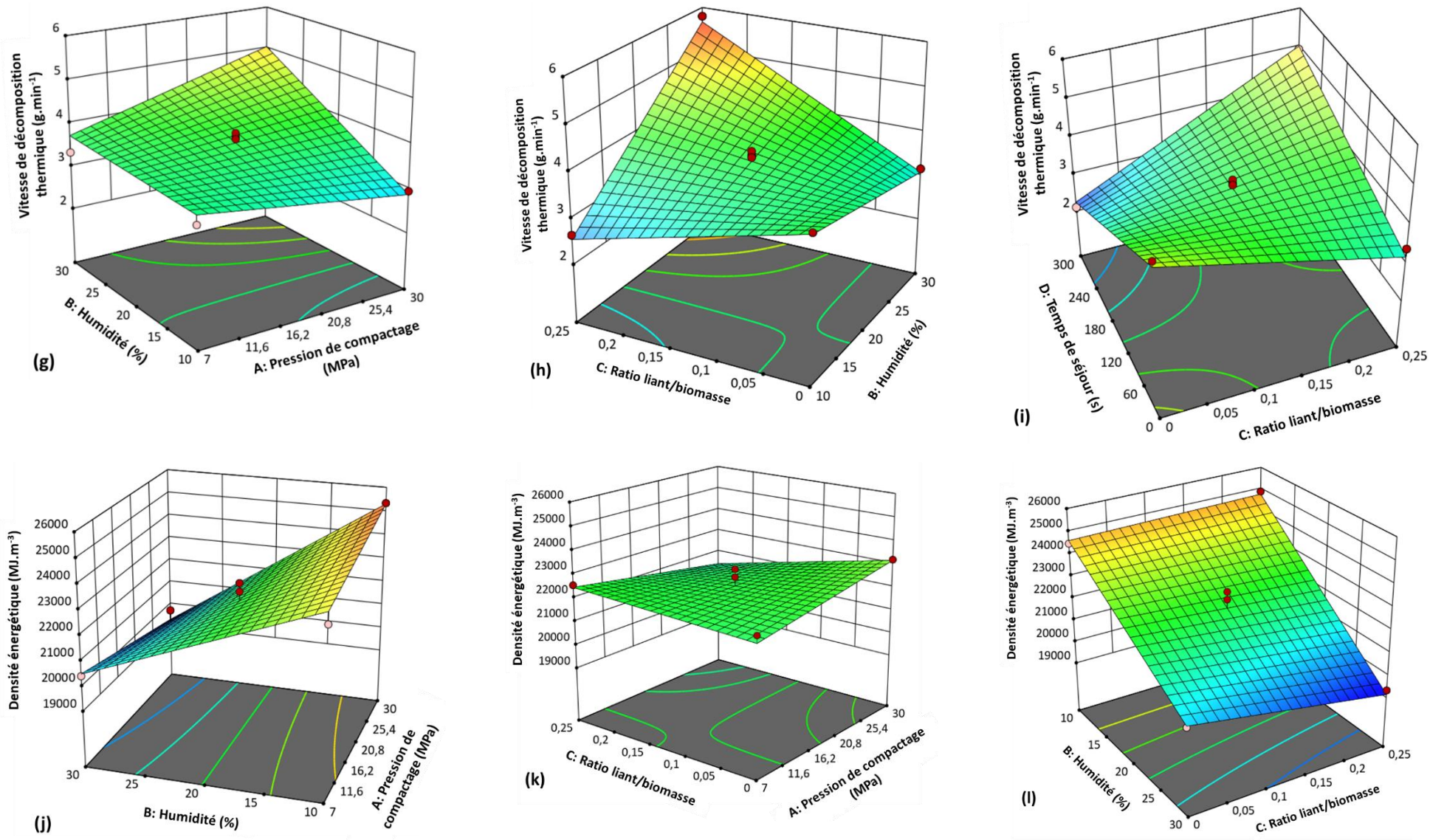


Figure 3.16. Courbes d'interaction 3D de la densification de TPo

3.2.3 Détermination des conditions optimales de densification de BBa et TPo

L'analyse du modèle polynomial quadratique et 2FI pour chacune des quatre réponses : densité apparente, résistance à la compression, vitesse de décomposition thermique et densité énergétique a montré que ces modèles sont précis et permettent de décrire les observations avec une précision supérieure à 96 %. Les résultats obtenus ont donc été utilisés pour déterminer les conditions optimales de densification de ces biomasses. Le but de cette optimisation était de déterminer les meilleures conditions de densification qui permettraient d'obtenir des briquettes présentant à la fois de bonnes propriétés mécaniques et thermiques. L'approche a consisté à trouver la meilleure combinaison possible entre les facteurs afin de maximiser les réponses relatives aux propriétés mécaniques (densité apparente et résistance à la compression), et celles relatives aux propriétés thermiques (vitesse de décomposition thermique et densité énergétique) des briquettes. La détermination de ces conditions optimales de densification s'est faite à partir d'une analyse multicritère basée sur les fonctions de désirabilité [18]. Chaque réponse a en effet été transformée en une fonction de désirabilité individuelle avec un critère objectif défini et un poids. La valeur de la fonction de désirabilité globale a été obtenue à partir de la moyenne géométrique des valeurs des fonctions de désirabilité individuelle. Les différents critères d'optimisation imposés aux facteurs sont consignés dans le Tableau 3.9, avec un niveau d'importance fixé à 3.

Tableau 3.9. Critères d'optimisation imposés aux facteurs

Facteur	Critère	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
Pression de compactage (kPa)	Dans l'intervalle	7	30	1	1	3
Humidité (%)	Dans l'intervalle	10	30	1	1	3
Ratio liant-biomasse	Dans l'intervalle	0	0,25	1	1	3
Temps de séjour (s)	Dans l'intervalle	0	300	1	1	3

Les critères d'optimisation imposés aux différentes réponses relatives aux biocombustibles briquettes de BBa et TPo sont quant à eux présentés dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10. Critères d'optimisation imposés aux réponses

Briquette	Réponse	Critère	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
BBa	DA	Maximiser	862,73	1058,24	1	1	3
	RC	Maximiser	594,91	3769,89	1	1	3
	VDT	Maximiser	3,34	4,20	1	1	3
	DE	Maximiser	19403,10	23926,60	1	1	3
TPo	DA	Maximiser	880,57	1129,52	1	1	3
	RC	Maximiser	84,92	1340,80	1	1	3
	VDT	Maximiser	2,10	5,80	1	1	3
	DE	Maximiser	19298,00	25349,50	1	1	3

Par application des différents critères d'optimisation, les conditions optimales des facteurs de densification de BBa et TPo obtenues sont présentées dans le Tableau 3.11. Les briquettes optimisées de BBa ont été formulées sans apport de liant (0 % de mélasse). Cependant, 10 % de mélasse ont été requises dans la formulation des briquettes optimisées de TPo. Cette différence pourrait être liée aux propriétés physico-chimiques des biomasses brutes de BBa et de TPo. En effet, la distribution granulométrique de BBa est dominée par les particules de petites tailles ($0,063<\Phi<0,4$ mm) puis cette biomasse a des teneurs en lignine (37,33 %) et en matière grasse résiduelle (24,23 %) plus élevées que celles de TPo (23,84 % pour la lignine et 19,79 pour la matière grasse). Ainsi, au cours de la densification, les particules de BBa ont présenté un plus grand nombre de points de contact, ce qui a créé une forte adhérence entre ces dernières sans apport de liant. De plus, la lignine semble avoir atteint sa transition vitreuse dans les conditions de densification de BBa, elle a donc agi comme un liant intrinsèque.

Tableau 3.11. Conditions optimales de densification de BBa et TPo

Briquette	Pression de compactage (kPa)	Humidité (%)	Ratio liant-biomasse	Temps de séjour (s)
BBa	15	12	0	300
TPo	18,5	20	0,1	180

Nous avons par la suite réalisé la densification de BBa et TPo dans les conditions optimales des facteurs susmentionnés, les briquettes optimisées ainsi obtenues avaient des diamètres et des

hauteurs respectivement de 5 cm et 9,4 cm pour les biocombustibles briquettes de BBa puis de 5 cm et 9,3 cm pour ceux de TPo. Ces biocombustibles briquettes optimisées de BBa et TPo avaient une texture lisse et ils ont pu être conservés pendant 12 mois sans qu'aucune détérioration apparente n'ait été observée. La Figure 3.17 présente une image de ces biocombustibles briquettes optimisées.

En outre, toutes les quatre réponses, c'est-à dire la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique des briquettes obtenues ont été mesurées. Les résultats expérimentaux obtenus ont été comparés à ceux prédits par les modèles théoriques tels que présentés dans le Tableau 3.12. La désirabilité globale obtenue est de 0,85 et 0,77 pour BBa et TPo respectivement. Le tableau montre que toutes les valeurs qui proviennent des résultats expérimentaux sont comprises dans les différents intervalles de confiance au seuil de 95 % pour chaque réponse. Les valeurs expérimentales sont donc proches de celles simulées. Le plan d'expériences Box-Behnken a de ce fait été efficace pour l'optimisation de la densification de BBa et de TPo.

(a) (b)

Figure 3.17. Biocombustibles briquettes optimisées de (a) BBa et (b) TPo

L'analyse du Tableau 3.12 indique que les densités apparentes des briquettes optimisées de BBa et de TPo sont supérieures à celle préconisée par la norme européenne EN 14961. De plus, les résistances à la compression de ces briquettes sont 9 fois (pour BBa) et 2,5 fois (pour TPo) plus grandes que la valeur de référence proposée par Richards et al. [135]. Ces résultats impliquent que les briquettes optimisées de BBa et TPo ont de bonnes propriétés mécaniques, ce qui facilitera leur usage dans les foyers à combustion, leur transport et leur stockage. Les briquettes optimisées de BBa (24,50 $MJ.m^{-3}$) et de TPo (23,40 $MJ.m^{-3}$) ont des densités énergétiques volumiques plus élevées que celle du bois d'eucalyptus (13,79 $MJ.m^{-3}$). Ainsi, un volume de

briquettes optimisées inférieur à celui du bois d'eucalyptus est requis pour satisfaire le même besoin énergétique. Par ailleurs, les vitesses de décomposition thermique des briquettes optimisées de BBa (3,93 $g.min^{-1}$) et de TPo (3,60 $g.min^{-1}$) sont supérieures à celle rapportée par Chungcharoen et al. [136] pour les briquettes à base d'un mélange composé de 65 % de coques d'anacarde, 25 % de coques d'arec et 10 % d'amidon (1,5 $g.min^{-1}$). Ces valeurs sont également proches de celle du bois d'eucalyptus (4,26 $g.min^{-1}$) qui est réputé avoir une très bonne combustibilité. D'une façon générale, il a été observé que les briquettes optimisées de BBa ont de meilleures propriétés mécaniques et thermiques que celles des briquettes optimisées de TPo.

Tableau 3.12. Réponses optimales prédites et mesurées pour les briquettes de BBa et TPo

	Briquette optimisée de BBa			Briquette optimisée de TPo			
Réponses	Valeurs optimales prédites	Intervalles de confiance à 95 %	Valeurs optimales mesurées	Valeurs optimales prédites	Intervalles de confiance à 95 %	Valeurs optimales mesurées	Références
Densité apparente (kg/m^3)	1015,24	[981,87 ; 1048,61]	1013,00	1090,14	[1078,67 ; 1101,61]	1098,38	900[a]
Résistance à la compression (kPa)	3063,38	[2735,36 ; 3391,41]	3062,34	918,33	[907,63 ; 929,04]	916,27	350[b]
Vitesse de décomposition thermique (g/min)	3,96	[3,87 ; 4,04]	3,93	3,59	[3,20 ; 3,97]	3,60	4,26[c]
Densité énergétique ($MJ/10^{-3}m^3$)	24,28	[23,64 ; 24,92]	24,50	22,82	[21,94 ; 23,71]	23,40	13,79[c]

[a](EN 14961), [b](Richards,1990) [135], [c]Bois d'eucalyptus (présente étude)

3.2.4 Caractérisation physicochimique des briquettes optimisées

Les caractéristiques physicochimiques des briquettes optimisées de BBa et TPo sont présentées par les graphes de la Figure 3.18. Les taux de matières volatiles, de cendre et de carbone fixe ont été déterminés sur base sèche. Les résultats montrent que le pouvoir calorifique supérieur (PCS) des briquettes optimisées de BBa est de 26,5 $MJ.kg^{-1}$ alors que celui de BBa brute était de 27,70 $MJ.kg^{-1}$. Cette légère baisse du PCS s'explique par la différence de taux d'humidité entre BBa brute (6,9 %) et les briquettes de BBa (8,16 %). La même baisse du PCS a également été observée entre TPo brut (23,12 $MJ.kg^{-1}$) et les briquettes optimisées de TPo (21,28 $MJ.kg^{-1}$). L'adjonction de 10 % de liant (mélasse) à TPo brut a contribué à baisser le PCS des briquettes produites. Cette diminution est due au fait que la mélasse présente un PCS inférieur à celui de TPo mais aussi à la différence de taux d'humidité entre TPo brut (5,9 %) et les briquettes de TPo (9,03 %). Par ailleurs, les PCS des briquettes optimisées de TPo et BBa sont supérieurs d'environ 3 à 8 $MJ.kg^{-1}$ respectivement par rapport à celui du bois d'eucalyptus. Ces PCS des briquettes optimisées de TPo et BBa sont aussi largement supérieurs au PCS des briquettes de la balle de millet (16,13 $MJkg^{-1}$) obtenues en utilisant la gomme arabique comme liant de densification tel que rapporté par Kuhe et al. [128]. Bien que les teneurs en cendre des briquettes optimisées de BBa et TPo produites soient supérieures à celle du bois d'eucalyptus, elles sont relativement faibles (% cendre < 5) comparativement à celles de nombreuses autres briquettes de biomasses retrouvées dans la littérature. Mainkaew et al. [124] dans leur étude sur la densification de la bouse d'éléphant ont par exemple rapporté un taux de cendre de 8,90 % pour les briquettes de cette biomasse. Ces teneurs en cendre des briquettes optimisées de BBa et TPo sont proches de celle recommandée par la norme Européenne EN ISO 17225 qui suggère un taux d'environ 3 % par rapport aux biocombustibles solides.

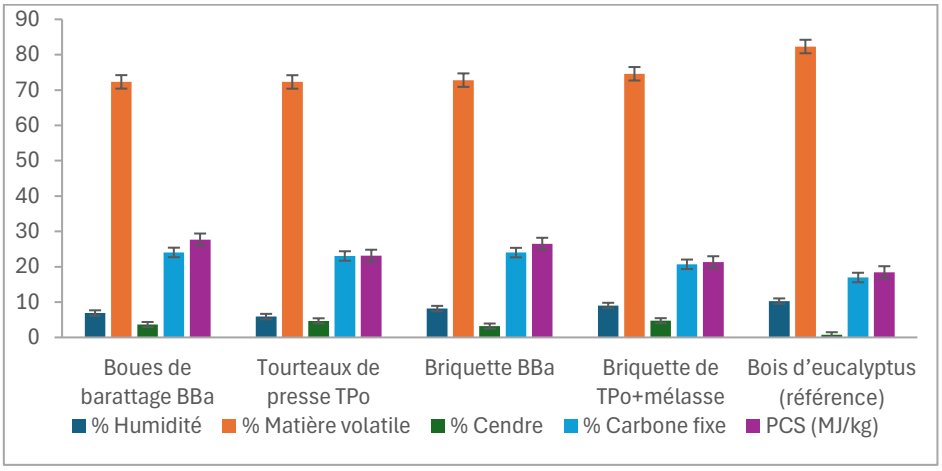


Figure 3.18. Propriétés physico-chimiques et pouvoirs calorifiques de BBa et TPo bruts et des briquettes optimisées de BBa et TPo

3.2.5 Efficacité thermique des briquettes optimisées

Le test d'ébullition de l'eau a été réalisé en utilisant les briquettes optimisées de BBa et TPo comme combustibles dans un foyer de combustion amélioré de type céramique et les résultats ont été comparés avec ceux du bois d'eucalyptus et ceux d'autres biomasses trouvées dans la littérature. Le test a consisté à porter à ébullition deux litres d'eau et à déterminer les paramètres tels que le temps d'ébullition, la consommation de combustible, la puissance de feu et la consommation spécifique correspondants (Figure 3.19).

(a) (b)

Figure 3.19. Test de combustion des briquettes optimisées dans un foyer de type céramique, (a) début du test, (b) 10 minutes après allumage

Il a été observé que le bois d'eucalyptus brûle avec une flamme plus intense que celles des briquettes de BBa et TPo. Cette observation s'explique par sa forte teneur en matières volatiles (82,30 %) comparativement à celles des briquettes de BBa (72,79 %) et TPo (74, 9 %). Les différents paramètres calculés à partir du test d'ébullition de l'eau sont présentés dans le Tableau 3.13. Les résultats montrent que par utilisation des briquettes optimisées de BBa, les 2 litres d'eau ont mis 24 minutes pour atteindre l'ébullition avec une consommation de briquettes de 251,37 g. Cette même quantité d'eau a atteint le point d'ébullition au bout de 40 minutes avec une consommation en combustibles de 277,18 g par usage des briquettes optimisées de TPo. Cette différence est due au processus d'allumage qui a duré plus longtemps avec les briquettes optimisées de TPo comparativement à celles de BBa. Ce résultat est corroboré par ceux de l'étude cinétique du paragraphe 2.2.5 du chapitre 2 où il a été démontré que l'énergie d'activation liée à la phase d'allumage de BBa (107,48 $kJ.mol^{-1}$) était inférieure à celle de TPo (112,55 $kJ.mol^{-1}$) et le facteur pré-exponentiel de BBa (1,69E+09 s^{-1}) était largement supérieur à celui de TPo (6,51E+08 s^{-1}). Ainsi, BBa requiert moins d'énergie pour

que sa décomposition thermique soit déclenchée par rapport à TPo et la densification de ce dernier avec la mélasse (liant) n'a pas inversé cette tendance. Le bois d'eucalyptus a quant à lui fait bouillir les 2 litres d'eau au bout de 13 minutes avec une consommation en combustibles d'environ 372 g. Cette consommation élevée en combustibles en un temps réduit est la conséquence de la forte dévolatilisation de ce combustible. Sawadogo et al. [129] ont rapporté un temps d'ébullition des 2 litres d'eau de 47 minutes et une puissance de feu de 1,34 kW pour les briquettes de charbon de coques d'anacarde tandis que Chungcharoen et Srisang [136] puis Yahaya et Ibrahim [137] ont rapporté des temps d'ébullition de 56 et 21 minutes pour les briquettes du mélange coques d'anacarde-coques d'arec et bois de chauffe respectivement.

Tableau 3.13. Paramètres thermiques de la combustion des briquettes optimisées de BBa, TPo et d'autres biocombustibles

	Temps d'ébullition (min)	Consommation de combustible (g)	Puissance de feu (kW)	Consommation spécifique ($kJ.l^{-1}.min^{-1}$)	Source
Briquettes de BBa	24	251,37	4,06	136,39	Présente étude
Briquettes de TPo	40	277,18	2,45	103,40	Présente étude
Bois d'eucalyptus	13	372,04	8,14	182,18	Présente étude
Briquettes de charbon de coques d'anacarde	47	-	1,34	131,09	[129]
Bois de chauffe	21	-	-	-	[137]
Briquettes de coques d'anacarde et d'arec	56	-	-	-	[136]

3.2.5.1 Analyses à la microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse par énergie dispersive de rayons X (EDX)

❖ **Cas des briquettes optimisées de BBa**

La Figure 3.20 présente les images MEB de la morphologie des particules à la surface de BBa brute et des briquettes optimisées de BBa. L'analyse de ces images révèle que BBa n'est pas une biomasse fibreuse et elle est très peu poreuse. Les morphologies des particules de surface sont variables avec des tailles irrégulières. Cette biomasse présente également des amas de plusieurs milliers de particules (Figure 3.20 (a, b)). BBa contient en effet une grande quantité

de matière grasse résiduelle (~24 %), donc la plupart de ses pores sont probablement occupées par ces molécules. La Figure 3.20 (c, d) montre que la densification de BBa a contribué à rapprocher les particules de surface et les briquettes ainsi produites présentent des agrégats.

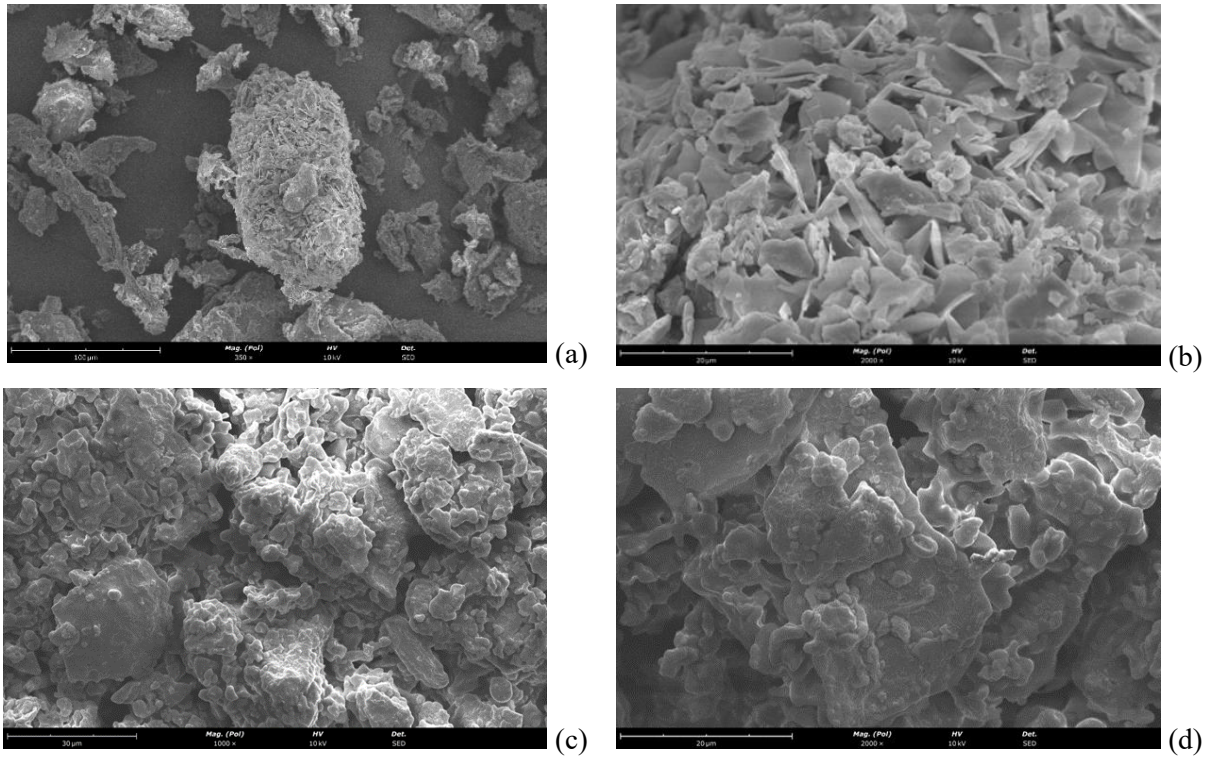


Figure 3.20. Images MEB de (a), (b) BBa brute et de (c), (d) Briquette optimisée de BBa

Les résultats de l'analyse EDX des briquettes optimisées de BBa exprimés en pourcentage massique sont présentés par la Figure 3.21. Les résultats montrent la présence de carbone (~ 51 %) et d'oxygène (~ 18 %) comme éléments majeurs. Les éléments minéraux, à savoir le potassium (1,5 %), le calcium (~ 1 %) et de palladium (7,3 %) ont également été détectés. La présence d'or détectée est due au revêtement d'une couche d'or que l'échantillon à analyser a subi dans le but d'augmenter sa conductivité électrique pour assurer la bonne tenue de l'analyse.

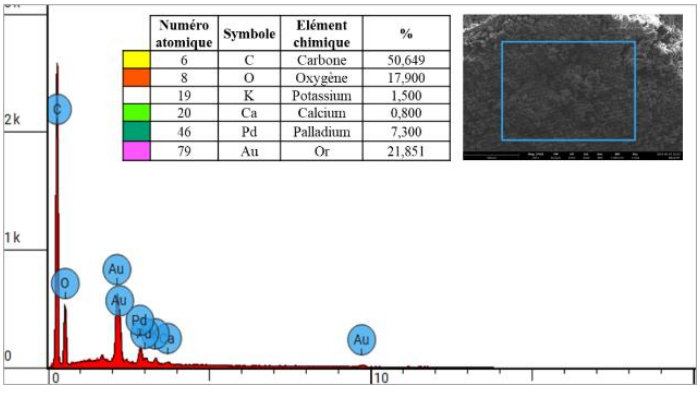


Figure 3.21. Analyse EDX d'une briquette optimisée de BBa

❖ Cas des briquettes optimisées de TPo

La Figure 3.22 présente les images MEB de TPo brut et des briquettes optimisées de TPo. Les résultats montrent que TPo a également une structure non fibreuse, les particules de surface ont différentes morphologies et il y a la présence de quelques macropores. Les particules sont plus dispersées comparativement à BBa (Figure 3.22 (a, b)). La densification de TPo a provoqué un rapprochement des différentes particules créant une agglomération (Figure 3.22 (c,d)).

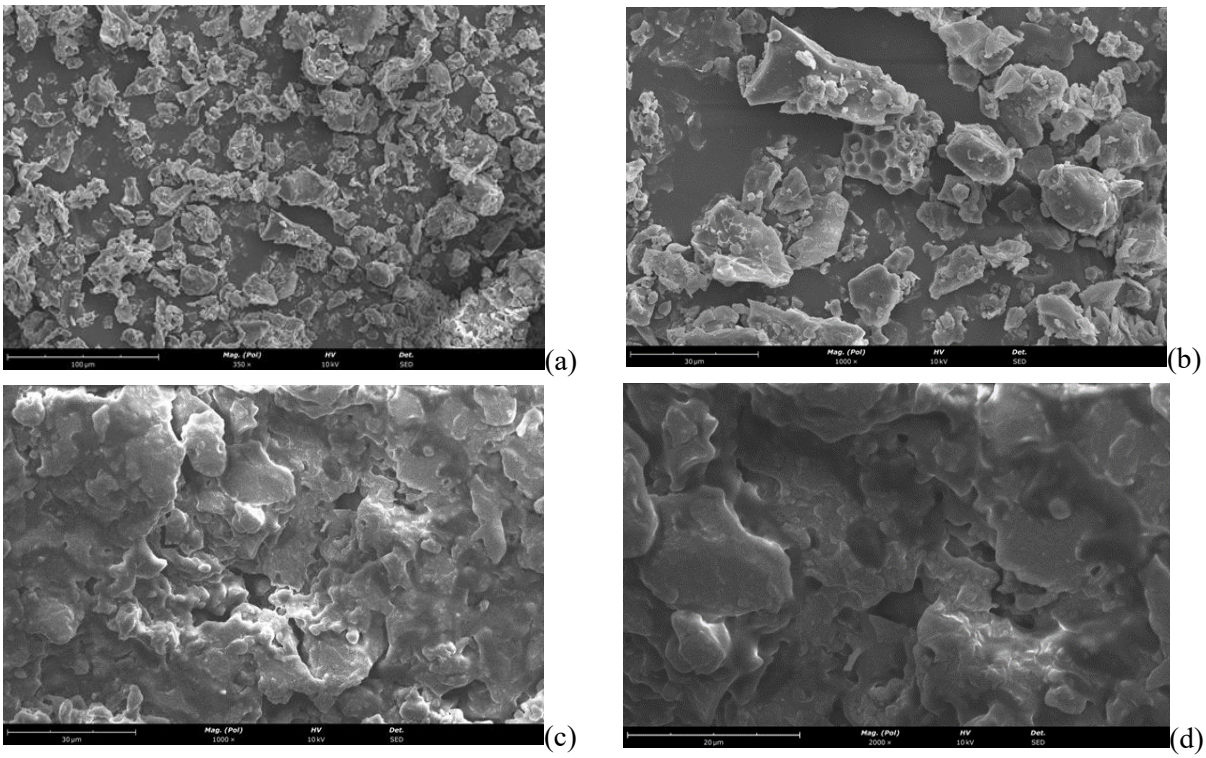


Figure 3.22. Images MEB de (a), (b) TPo brut et de (c), (d) briquette optimisée de TPo

Les résultats de l'analyse EDX des biocombustibles briquettes optimisées de TPo sont présentés par la Figure 3.23. Le carbone et l'oxygène ont été détectés comme étant les éléments majeurs de ces briquettes. Les éléments minéraux tels que le potassium et le palladium ont été détectés à des proportions moindres.

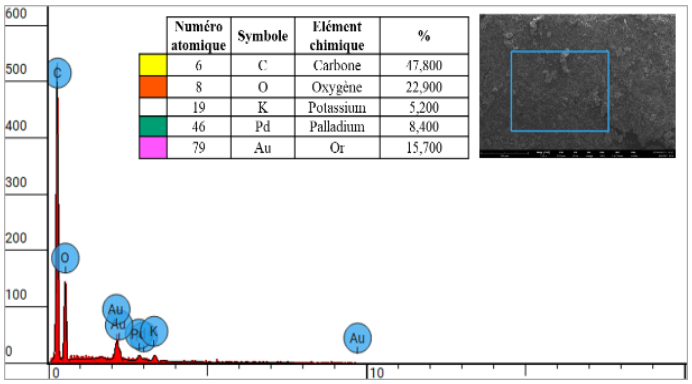


Figure 3.23. Analyses EDX des briquettes optimisées de TPo

Conclusion partielle

La méthodologie de surface de réponse a permis dans un premier temps d'étudier les effets de la pression de compactage, du taux d'humidité, du ratio liant/biomasse et du temps de séjour sur la densification de BBa et TPo à travers la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique. Elle a ensuite permis de proposer les conditions optimales de densification pour produire des biocombustibles briquettes qui allient à la fois de bonnes propriétés mécaniques et thermiques. Ces conditions sont : 15 kPa de pression de compactage, 12 % de taux d'humidité, 0 % de liant et 300 s de temps de séjour pour BBa puis 18,5 kPa, 20 %, 10 % et 180 s pour TPo. Les briquettes optimales de BBa ont été produites sans apport de liant de densification tandis que 10 % de liant ont été nécessaires pour les briquettes optimales de TPo.

Les briquettes optimales produites ont présenté des propriétés mécaniques (densité apparente, résistances à la compression et à l'impact) au-dessus des normes relatives aux biocombustibles densifiés, des pouvoirs calorifiques supérieurs plus élevés que ceux du bois de chauffe et des performances thermiques importantes.

Puisque les biomasses densifiées contiennent des quantités importantes de matière grasse résiduelle, BBa a subi une étape de mouture au cours de la production du beurre de karité et qu'une certaine quantité de mélasse (liant) a été nécessaire dans la formulation des briquettes optimisées de TPo, nous allons étudier les influences de ces paramètres sur la densification dans le chapitre 4 du manuscrit. De plus, la teneur en azote des biomasses densifiées étant supérieure à celle du bois de chauffe, les gaz émis par la combustion des biomasses brutes et de leurs briquettes seront analysés et les résultats seront comparés aux normes en vigueur.

Chapitre 4 :

Etude de l’influence des propriétés physico-chimiques de la biomasse et du type de liant sur la densification et la composition des gaz de combustion

Chapitre 4 : Etude de l'influence des propriétés physico-chimiques de la biomasse et du type de liant sur la densification et la composition des gaz de combustion

Introduction

L'étude visant à optimiser la densification, dans le domaine d'étude précédemment établi, a permis d'obtenir des biocombustibles briquettes sans liant à partir des boues de barattage. Toutefois, les biocombustibles briquettes des tourteaux de presse ont été obtenues avec un apport de 10 % de liant. Ces résultats démontrent bien que les propriétés physico-chimiques de la matrice de base ainsi que celles du liant influencent les conditions de densification des résidus de transformation des amandes de karité ainsi que la qualité finale du biocombustible. En effet, les boues de barattage et les tourteaux issus de la presse présentent des différences notables en termes de granulométrie, de composition chimique et de teneurs en composés extractibles. De plus, il est bien établi que le coût et la disponibilité du liant utilisé dans le processus de densification peuvent avoir un impact significatif sur le coût de production des biocombustibles briquettes. Une bonne compréhension et un contrôle approprié de ces propriétés contribueront à assurer une meilleure stabilité et durabilité des briquettes produites et d'améliorer leur efficacité thermique. Ainsi, ce chapitre vise à étudier l'influence des propriétés ci-dessus mentionnées et des liants sur la performance et la composition des gaz de combustion des biocombustibles briquettes des résidus des amandes de karité.

Dans la première section de ce chapitre, l'influence du prétraitement des tourteaux de presse (déshuilage, diminution de la taille des particules) et du type de liant sur les performances des briquettes produites sont d'une part évaluée. D'autre part, les propriétés de ces briquettes sont comparées à celles des briquettes des boues de barattage et des échantillons de références.

La seconde section porte sur l'analyse des gaz de combustion de la biomasse brute et celle des briquettes optimisées, en particulier les concentrations de dioxygène (O_2), dioxyde de carbone (CO_2), monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NOx) et des hydrocarbures (HC). En outre, les influences de l'excès d'air sur les émissions de CO et NOx, puis du type de liant de densification sur les émissions de NOx sont analysées.

La dernière section du chapitre inclut une étude financière de la production de biocombustibles briquettes à partir des résidus de transformation des amandes de karité. Deux cas y sont

présentés ; le premier cas porte sur la production de biocombustibles briquettes de boues de barattage sans usage de liant de densification. Le deuxième cas concerne la production de biocombustibles briquettes de tourteaux de presse avec 10 % de liant de densification. Dans chacun des deux cas, le scénario dans lequel une Petite et Moyenne Entreprise (PME) dispose elle-même d'une quantité suffisante de résidus pour produire les biocombustibles briquettes et celui où elle achète les résidus auprès d'autres structures sont évalués.

4.1 Matériel et méthodes

4.1.1 Collecte et préparation des liants de densification

Trois liants organiques présentés par la Figure 4.1 ont été considérés dans la présente étude pour la densification des tourteaux de presse. Il s'agit de la mélasse, la gomme arabique et l'amidon de manioc. La mélasse a été fournie par la structure de production sucrière SN-SOSUCO située à Banfora, Burkina Faso. La gomme arabique et l'amidon de manioc ont été prélevés à Ouagadougou, Burkina Faso. Les trois liants de densification collectés sont tous disponibles au Burkina Faso et dans les pays de l'Afrique subsaharienne.

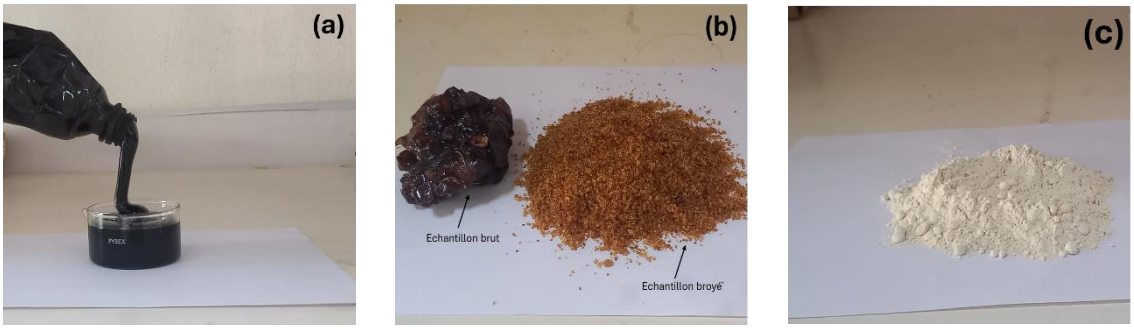


Figure 4.1. Liants de densification sélectionnés : (a) Mélasse, (b) Gomme arabique et (c) Amidon de manioc

La mélasse a été utilisée telle qu'elle a été reçue. Le manioc préalablement séché a été broyé et tamisé avec un tamis de maille 500 µm. La farine obtenue a été mélangée avec de l'eau dans les proportions (1:10). Le mélange obtenu a été chauffé à la température de 70 °C jusqu'à l'obtention d'une solution gélatineuse. Une proportion de cette dernière a été mélangée à la biomasse à densifier. La gomme arabique sèche a également été broyée pour retenir les particules de tailles inférieures à 500 µm. La poudre obtenue a ensuite été solubilisée dans de l'eau en agitant la solution pour bien l'homogénéiser. Une certaine quantité de la solution obtenue a été mélangée à la biomasse à densifier.

4.1.2 Analyse des gaz de combustion

Le débit d'air stœchiométrique représente la quantité d'air par unité de temps nécessaire pour assurer la combustion d'une certaine quantité de combustible dans les conditions stœchiométriques. Pour un combustible dont la formule brute est $C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\theta$, la relation stœchiométrique peut être exprimée par l'équation 4.1 :

$$C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\theta + \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right)(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow \alpha CO_2 + \frac{\beta}{2}H_2O + \left[3{,}76\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) + \frac{\theta}{2}\right]N_2 \qquad (4.1)$$

A partir de l'équation 4.1, le débit molaire s'écrit :

$$\dot{n}_{air,st} = 4{,}76\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \times \dot{n}_{biom} \quad (4.2)$$

Où:

α, β, γ et θ représentent les fractions molaires et $\dot{n}_{biom} = \dot{n}_{C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\theta}$

Sachant que: $\dot{n}_{biom} = \frac{\dot{m}_{biom}}{M_{biom}}$, l'équation 4.2 se réarrange comme suit :

$$\dot{n}_{air,st} = 4.76\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \times \frac{\dot{m}_{biom}}{M_{biom}} \quad (4.3)$$

En considérant la loi des gaz parfait : $PV = nRT$, on obtient le débit volumique d'air :

$$\dot{V}_{air,st} = \frac{\dot{n}_{air,st} RT_{amb}}{P_{amb}} \quad (4.4)$$

Où :

R est la constante des gaz parfait dont la valeur est 8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}

T_{amb} représente la température ambiante, en (K)

P_{amb} est la pression atmosphérique, en (P_a)

La combinaison des équations 4.3 et 4.4 conduit à l'équation 4.5 :

$$\dot{V}_{air,st} = \frac{RT_{amb}}{P_{amb}} \times 4.76\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \times \frac{\dot{m}_{biom}}{M_{biom}} \quad (4.5)$$

Où :

$\dot{V}_{air,st}$ est le débit volumique d'air, en (m^3.min^{-1})

$\dot{m}_{biom}$ est la vitesse de décomposition de la biomasse (kg.min^{-1})

M_{biom} est la masse molaire de la biomasse (kg.kmol^{-1})

4.1.2.1 Cas des biomasses brutes

- **Dispositif expérimental**

Les gaz de combustion des biomasses brutes de boues de barattage (BBa), tourteaux de presse (TPo) et de tourteaux de presse déshuilés (TPo.d) ont été analysés à l'aide d'un dispositif expérimental constitué d'un four tubulaire horizontal Thermolab (Figure 4.2), un système de condensation de gaz, un analyseur et d'un ordinateur d'acquisition de données.

Figure 4.2. Four tubulaire horizontal Thermolab

À la sortie du four tubulaire, les gaz de combustion passent à travers un système de condensation où les gaz condensables sont récupérés dans un ballon à fond rond tandis que les gaz incondensables sont acheminés vers l'analyseur de gaz. Le dispositif d'analyse des gaz utilisé comprenait en plus du détecteur de O_2, un capteur infrarouge non dispersif pour la mesure de CO et CO_2, un détecteur à ionisation de flamme pour la mesure des hydrocarbures HC et un détecteur de chimiluminescence pour la mesure des NOx. Des mélanges standards ont été utilisés avant et après chaque mesure pour étalonner les analyseurs. Avant d'être analysés, l'humidité et toutes les impuretés des gaz de combustion ont été éliminées à l'aide d'un piège à coton et d'un séchoir à silice. Une pompe et un débitmètre ont été utilisés pour s'assurer que le débit volumique soit maintenu pendant les mesures. Le schéma synoptique de l'ensemble du dispositif constitué par le système d'analyse des gaz de combustion et le four tubulaire est présenté par la Figure 4.3.

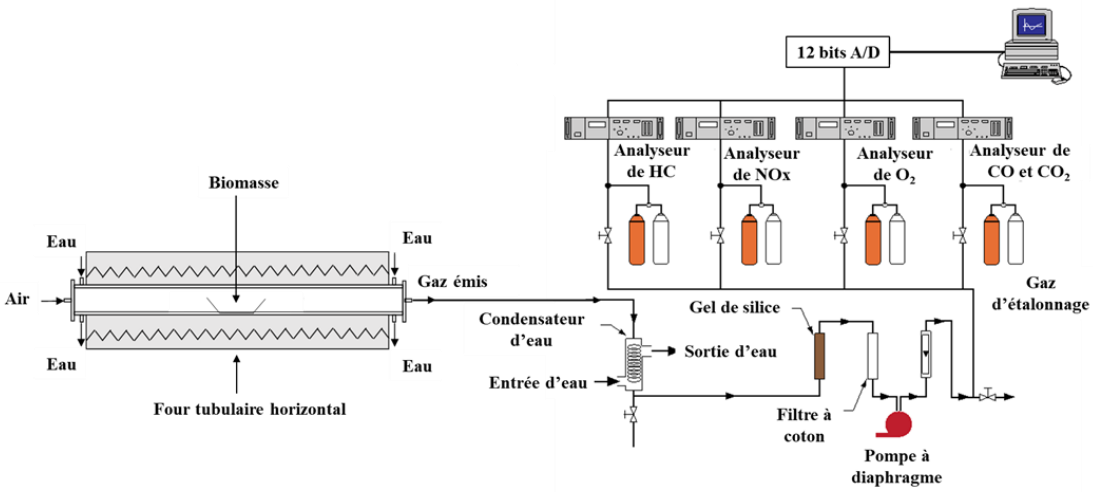


Figure 4.3. Schéma synoptique du dispositif d'analyse des gaz de combustion des biomasses brutes

❖ **Protocole d'analyse**

Une masse de 1 g de biomasse broyée et tamisée avec un tamis de taille des mailles $\Phi < 2$ mm a été pesée dans un porte-échantillon et placée à l'intérieur de la chambre de combustion. Ensuite, l'échantillon a été chauffé à une température allant de 20 à 800 °C à des vitesses de chauffe de 5, 10 et 20 °C.min^{-1}. L'air comprimé, utilisé comme gaz d'analyse a été injecté continuellement dans la chambre de combustion avec un débit de 1,5 l.min^{-1}. A la sortie de la chambre de combustion, les gaz émis ont été analysés en termes de concentration en O_2, CO_2, CO, NOx et HC.

4.1.2.2 Cas des briquettes de BBa et de TPo

❖ **Dispositif expérimental**

Une chambre de combustion spécifique en acier d'une longueur de 115,18 cm avec un diamètre intérieur de 12,5 cm et un diamètre extérieur de 12,8 cm tel que présenté par la Figure 4.4 (a) a été conçue pour réaliser la combustion des briquettes optimisées. Cette chambre de combustion a ensuite été insérée dans un four contenant des résistances électriques et contrôlé par un régulateur de température PID Eurotherm 3216 (Figure 4.4 (b)). L'ensemble constitué par la chambre de combustion et le four a permis de réaliser la combustion des briquettes optimisées dans un environnement contrôlé.

(a)

(b)

Figure 4.4. (a) Chambre de combustion et (b) Chambre de combustion + four électrique

À la sortie de la chambre de combustion, les gaz émis ont été analysés avec l'analyseur présenté dans la section 4.1.2.1 de ce chapitre. Le schéma synoptique de l'ensemble du dispositif utilisé pour l'analyse des gaz de combustion des biocombustibles briquettes est présenté par la Figure *4.5*.

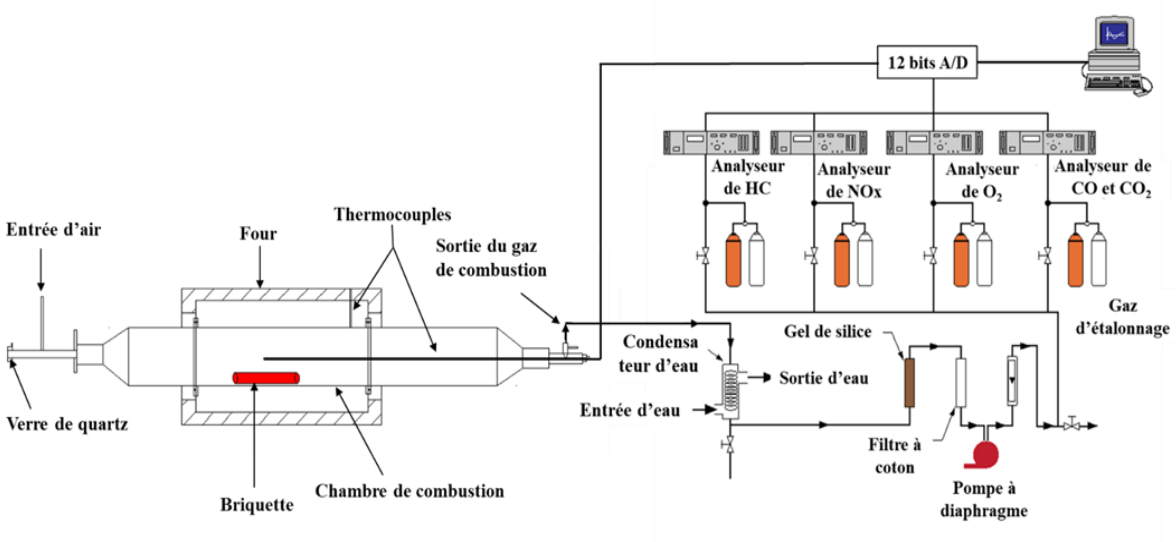


Figure 4.5. Schéma synoptique du dispositif d'analyse des gaz de combustion

❖ **Protocole d'analyse**

La chambre de combustion a été chauffée à une température variant de la température ambiante (20 °C) à la température de 500 °C avec une vitesse de chauffe de 30 °C.min^{-1}. La température de 500 °C a ensuite a été maintenue afin de fournir une chaleur suffisante pour la combustion de la briquette. De l'air comprimé a été utilisé comme gaz d'analyse. À la sortie de la chambre de combustion, les gaz incondensables ont été acheminés vers l'analyseur de gaz pour y être analysés en termes de concentrations en O_2, CO_2, CO, NO_X et HC. La température à l'intérieur de la chambre de combustion a quant à elle été suivie à l'aide d'un thermocouple de type S.

4.1.3 Impact environnemental

L'utilisation des briquettes produites à partir des résidus de transformation des amandes de karité pourrait contribuer à réduire la quantité de bois de chauffe brûlée dans les PME ainsi que l'empreinte carbone de ces dernières. Cette quantité de bois susceptible d'être réduite et le gain de CO_2 afférant ont été estimés suivant les étapes ci-dessous.

4.1.3.1 Potentiel théorique des résidus

Le potentiel théorique des résidus de transformation des amandes de karité fait référence à la quantité théorique susceptible d'être annuellement générée au Burkina Faso. Il a été déterminé

à partir des données statistiques de la production annuelle d'amandes de karité et du ratio résidu sur produit (RPR). Le calcul a été effectué suivant l'équation 4.6 [138].

$$Q_t = P_a \times RPR \qquad (4.6)$$

Où :

Q_t : représente le potentiel théorique des résidus, en (t)

P_a : est la production annuelle d'amandes de karité, en (t)

RPR : est le ratio produit sur résidu

4.1.3.2 Potentiel de résidu mobilisable

Le potentiel mobilisable des résidus issus de la transformation des amandes de karité représente la fraction du potentiel théorique qui peut réellement être collectée en tenant compte des éventuelles réglementations parmi lesquelles figure la quantité de résidu à laisser au sol. Il a été déterminé à partir de l'équation 4.7.

$$Q_m = Q_t \times \alpha \qquad (4.7)$$

Où :

Q_m : représente le potentiel mobilisable des résidus, en (t)

Q_t : est le potentiel théorique des résidus, en (t)

α : représente la fraction mobilisable, en (t)

4.1.3.3 Potentiel énergétique des briquettes, quantité de bois équivalente et gain en CO_2

Le potentiel énergétique des briquettes susceptibles d'être produites à partir de la quantité annuelle de résidus mobilisables a été calculé à partir de l'équation 4.8. La quantité équivalente de bois ainsi que le gain en CO_2 ont été respectivement déterminés à partir des équations 4.9 et 4.10.

- **Potentiel énergétique des briquettes**

$$E_{an} = Q_{bri} \times (PCS)_{bri} \qquad (4.8)$$

Où :

E_{an} : représente la quantité d'énergie produite par les briquettes par année, en (kWh)

Q_{bri} : est la quantité de briquettes produite par année, en (t)

$(PCS)_{bri}$: est le pouvoir calorifique supérieur d'une briquette, en (kWh/t)

❖ **Quantité équivalente de bois**

$$(Bois)_{éq} = \frac{Q_{bri} \times (PCS)_{bri}}{(PCS)_{bois}} \quad (4.9)$$

Où :

(Bois)éq : est la quantité de bois sauvegardée par an, en (t)

(PCS)bois : est le pouvoir calorifique supérieur du bois, en (kWh/t)

❖ **Gain en CO_2**

$$(CO_2)_{éq} = (Bois)_{éq} \times (éq.CO_2)_{bois} \quad (4.10)$$

Où :

(CO₂)éq : représente le gain en CO_2 annuel, en (kg éq. CO_2)

(éq. CO₂)bois : est l'équivalent CO_2 du bois : 1,8 t CO_2/ t de bois

4.2 Résultats et discussions

4.2.1 Propriétés physico-chimiques des liants sélectionnés

Les principales caractéristiques physico-chimiques des trois liants sélectionnés à savoir la mélasse, la gomme arabique et l'amidon de manioc sont présentées par la Figure 4.6. Les résultats montrent que les teneurs en cendre de ces liants varient de 2,05 à 5,6 % ; la farine de manioc présente la plus petite valeur (2,05 %). En outre, les trois liants ont des contenus énergétiques moyennement élevés avec des pouvoirs calorifiques supérieurs (PCS) allant de 16,5 $MJ.kg^{-1}$ pour la farine de manioc à 17,5 $MJ.kg^{-1}$ pour la mélasse. Les taux de matières volatiles de la mélasse, la gomme arabique et la farine de manioc sont tous supérieurs à 80 %. Ce fort taux de matière volatile pourrait contribuer à faciliter l'inflammabilité des briquettes produites à partir de ces liants de densification. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Olugbade et al. [139].

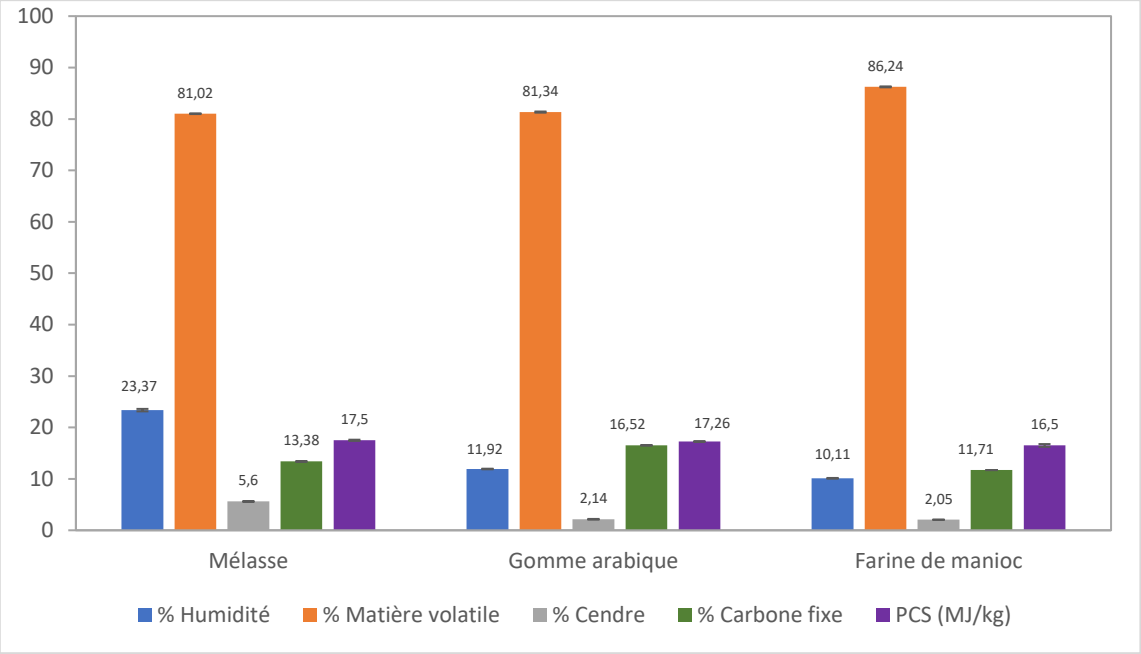


Figure 4.6. Propriétés physico-chimiques des liants sélectionnés

4.2.2 Influence des propriétés physico-chimiques et du type de liant sur la densification des tourteaux de presse (TPo)

4.2.2.1 Densification de TPo avec liant

❖ **Influence du déshuilage de TPo sur les propriétés des biocombustibles briquettes**

Dans le but d'évaluer l'influence du déshuilage sur la densification de TPo, des briquettes de tourteaux de presse déshuilés (TPo.d) ont été produites dans les conditions optimales des facteurs obtenues pour TPo, c'est-à-dire en utilisant un taux d'humidité = 20 %, un taux de mélasse = 10 %, une pression de compactage = 18,5 MPa et un temps de séjour de 180 s. La teneur en matière grasse résiduelle de TPo.d (3,14 %) est inférieure à celle obtenue pour TPo (~20 %). Ensuite, les propriétés mécaniques et thermiques des biocombustibles briquettes de TPo.d produites ont été évaluées à travers les paramètres DA, RC, VDT et DE puis comparées à celles des briquettes de TPo. Les résultats ont montré que les valeurs de DA, RC et DE des briquettes de TPo.d sont d'une part toutes inférieures à celles de TPo (Figure 4.7) et d'autre part, elles sont supérieures aux valeurs de références mentionnées sur la figure ci-dessous. Bien que les valeurs relatives aux propriétés mécaniques, à savoir DA et RC soient supérieures aux valeurs de référence, les briquettes de TPo.d ont présenté des fines fissures, trois semaines après séchage (Figure 4.8 (a)). Ces résultats suggèrent que la présence de la matière grasse, en particulier dans TPo, a amélioré la durabilité des briquettes, en leur conférant une résistance

plus accrue. Il a été rapporté que la matière grasse intrinsèque de la paroi cellulaire des biomasses pourrait agir comme un agent liant, favorisant la formation de ponts solides, ce qui conduit à une meilleure cohésion entre les particules lors du compactage et augmente la durabilité des biocombustibles briquettes produites [71].

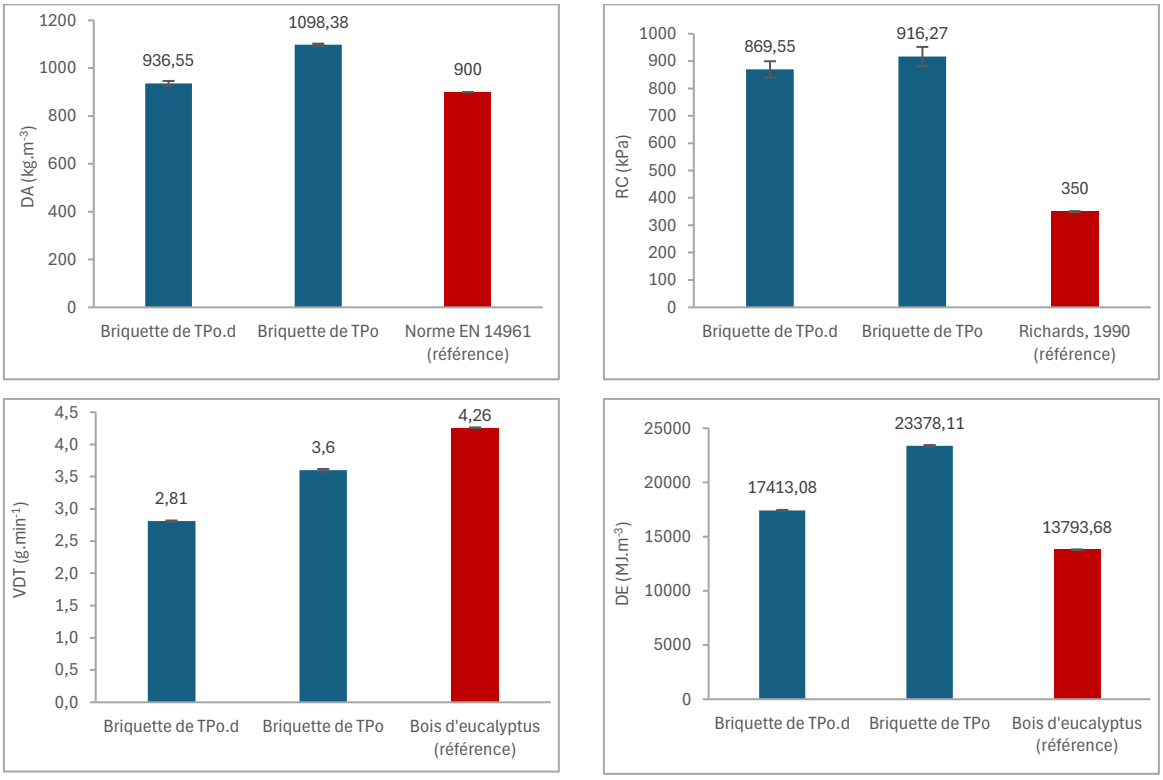


Figure 4.7. Influence de la matière grasse résiduelle sur la densification de TPo

Il est important de relever que le démoulage des briquettes de TPo n'a rencontré aucune difficulté notable, contrairement à celui des briquettes de TPo.d. En effet, pendant la production des briquettes de TPo.d, quelques difficultés techniques ont été observées, en particulier lors du démoulage. Bien que leur formulation ait été réalisée avec un taux d'humidité de 20 %, et un taux de mélasse de 10 %, le compactage a provoqué leur assèchement, ce qui a induit une forte adhérence de leur surface externe au moule. En conséquence, le démoulage de ces briquettes a requis une force plus importante, ce qui a contribué à les fragiliser et à altérer leur qualité finale.

Cette observation met en évidence le rôle que joue la matière grasse de la biomasse à densifier dans la cohésion et la facilité de démoulage des biocombustibles briquettes qui en découlent. En effet, lors du processus de compactage, la matière grasse présente dans TPo, a été repoussée vers la surface externe de la briquette, celle-ci étant en contact direct avec le moule. Ce phénomène a réduit l'adhérence de la surface externe de la briquette à celle du moule, facilitant ainsi le démoulage. Ces observations montrent clairement que la présence de matière grasse

dans les résidus de transformation des amandes de karité joue un rôle important non seulement dans l'amélioration de la texture et de la résistance des briquettes, mais également dans leur facilité de retrait du moule. Ce facteur pourrait être un élément déterminant à prendre en compte pour les processus de production des biocombustibles briquettes à grande échelle.

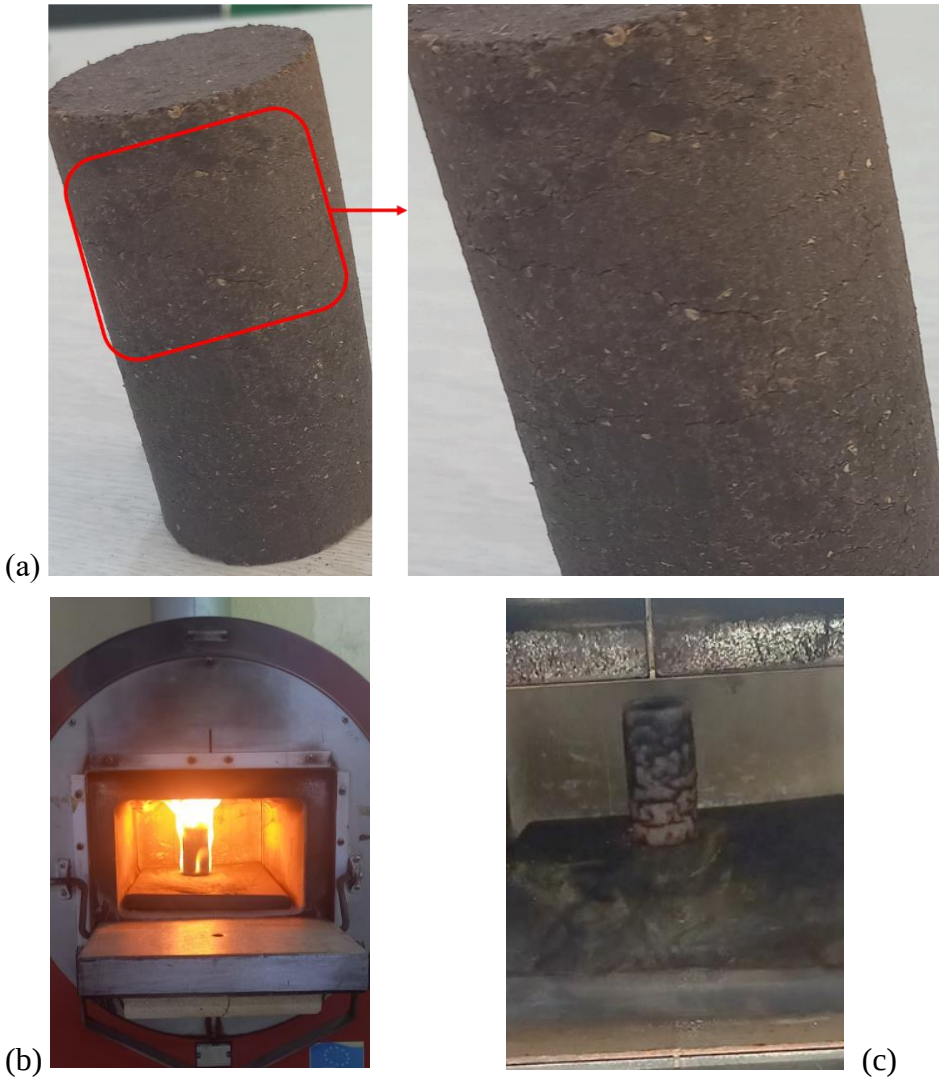


Figure 4.8. (a) Briquette de TPo.d présentant des fissures, (b) combustion de TPo et (c) combustion de TPo.d

Les tests de combustion réalisés dans un four à moufle à 500 °C tels qu'illustrés par la Figure 4.8 à travers les images (b) et (c), ont révélé une inflammation des biocombustibles briquettes de TPo, contrairement à ceux de TPo.d. De plus, la quantité de charbon résiduel récupérée à la fin du test de combustion des briquettes de TPo (22,43 %) était inférieure à celle des briquettes de TPo.d (30,71 %) et les VDT mesurées étaient de 3,26 et 2,81 $g.min^{-1}$ respectivement pour les briquettes de TPo et celles de TPo.d. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que TPo présente des teneurs plus élevées en matière grasse résiduelle (~20 %) et en matières volatiles (72,28 %) par rapport à celles de TPo.d (3,14 % et 65,84 % respectivement). En Effet, la matière

grasse a la particularité d'être plus thermosensible, elle s'enflamme beaucoup plus rapidement par rapport aux autres matières solides, en raison de son faible point d'inflammation. En revanche, les matières solides, telles que la cellulose ou la lignine, qui sont les constituants les plus abondants de TPo.d, ont des caractéristiques thermiques plus stables et prennent plus de temps à se décomposer et à s'enflammer. Cette différence dans la réactivité thermique pourrait expliquer pourquoi les briquettes de TPo s'enflamment plus rapidement et de manière plus intense lors des tests de combustion.

❖ Influence de la taille des particules de TPo sur les propriétés des biocombustibles briquettes

L'influence de la taille des particules sur la densification de TPo a été évaluée en formulant des biocombustibles briquettes de cet échantillon à partir de trois tailles de particules à savoir $\Phi <$ 1,6 mm ; $\Phi <$ 1 mm et $\Phi <$ 0,4 mm. Les briquettes ont été produites à partir des valeurs des facteurs prises au centre de leurs domaines expérimentaux, c'est-à-dire 18,5 kPa de pression de compactage, 20 % de taux d'humidité, 12,5 % de liant et un temps de séjour de 150 s. Les résultats obtenus ont permis de construire les histogrammes présentés par la Figure 4.9. L'analyse de ces résultats a montré que les propriétés mécaniques, à savoir la résistance à la compression et la densité apparente des briquettes augmentent quand la taille des particules de TPo diminue de 1,6 à 0,4 mm. La résistance à la compression des briquettes issues de TPo ayant des tailles de particules $\Phi <$ 0,4 mm vaut à peu près 3 fois celle des briquettes issues de TPo dont les tailles de particules sont : $\Phi <$ 1,6 mm. En effet, lorsque les particules de la biomasse à densifier sont de petites tailles, ces dernières sont plus proches les unes des autres, ce qui favorise le développement de ponts solides à travers des forces à courte portée telles que les ponts hydrogène et les forces de Van Der Waals. De plus, dans ces conditions, les distances intermoléculaires baissent et les forces d'attraction intermoléculaires augmentent [140]. Ainsi, la briquette produite a une grande cohésion interparticulaires et présente de meilleures propriétés mécaniques. Par ailleurs, la densité apparente des briquettes produites avec TPo ayant une taille de particules $\Phi <$ 0,4 mm est plus élevée que celles des briquettes provenant de TPo $\Phi <$ 1 mm et TPo $\Phi <$ 1,6 mm. La densité apparente est donc inversement proportionnelle à la taille des particules. En effet, plus la biomasse à densifier présente de grandes tailles de particules, plus grande sera la quantité d'air entre ces dernières, ce qui entrainera une diminution de la densité apparente [141]. Ce résultat est en accord avec ceux issus de précédentes études sur les briquettes de sciure de bois, rapportés par Mitchual et al. [142] et sur les briquettes de coques de café [143]. Ainsi, lorsque la biomasse à densifier est constituée de particules de

petites tailles, les briquettes produites présentent de meilleures propriétés mécaniques. Les résultats ont également montré que la réduction de la taille des particules n'a pas exercé une grande influence sur la vitesse de décomposition thermique (VDT) et la densité énergétique (DE) des biocombustibles briquettes produites. Les valeurs de VDT obtenues étaient toutes inférieures à celle du bois d'eucalyptus, mais les DE étaient supérieures à celle de ce dernier.

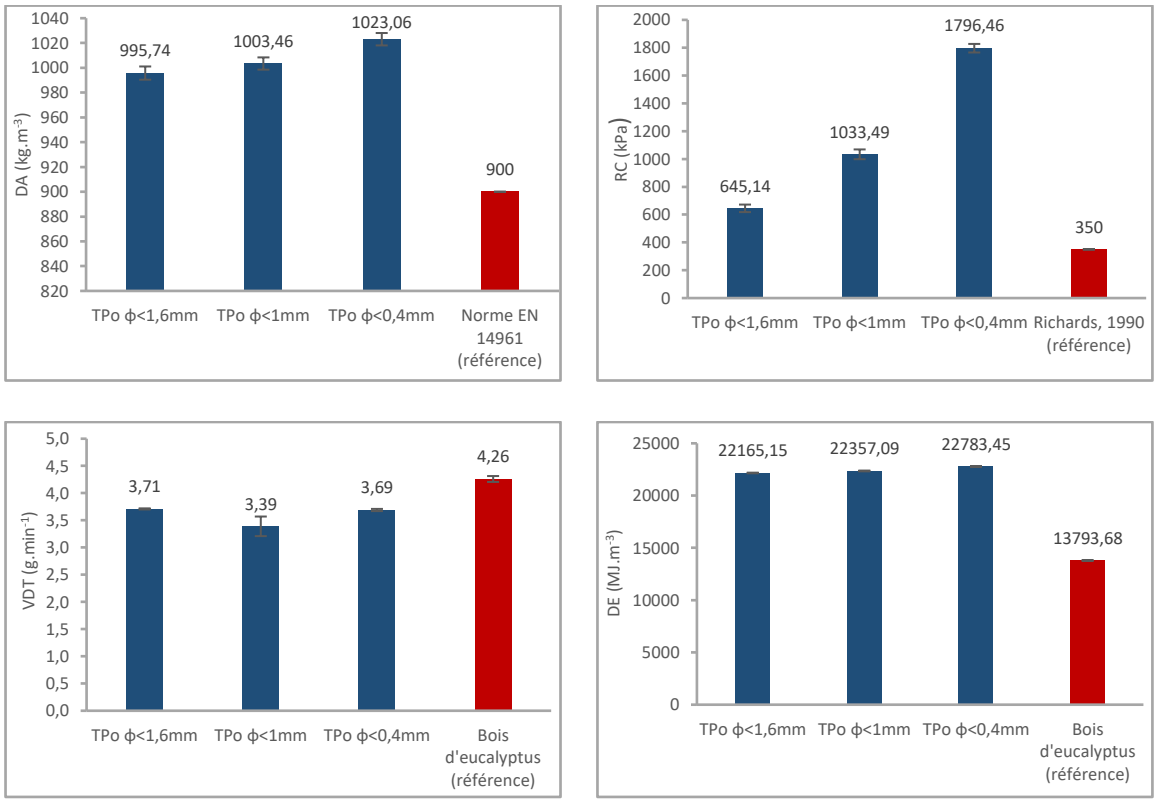


Figure 4.9. Influence de la taille des particules sur la densification de TPo

4.2.2.2 Influence du type de liant sur les propriétés des biocombustibles briquettes

En vue d'évaluer l'influence du type de liant sur les propriétés mécaniques et thermiques des biocombustibles briquettes, l'amidon de manioc, la gomme arabique et la mélasse ont été utilisés comme liants pour formuler des briquettes de TPo dans les conditions optimales, c'est-à dire avec une pression de compactage de 18,5 kPa, 20 % de taux d'humidité, 10 % de liant et un temps de séjour de 180 s. Les résultats relatifs à la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique de ces briquettes sont présentés par la Figure 4.10. Ces résultats montrent que quel que soit le type de liant utilisé, toutes les briquettes ont une densité apparente et une résistance à la compression supérieures à celles des valeurs de référence, à savoir la norme EN 14961 et les résultats des travaux de (Richards,1990) respectivement. Les briquettes produites avec l'amidon de manioc ont présenté

les plus faibles valeurs relatives à la densité apparente (~ 985 $kg.m^{-3}$), la résistance à la compression (~ 693 kPa) et la densité énergétique (~ 21.10^3 $MJ.m^{-3}$). Cependant, ces briquettes avaient la plus grande vitesse de décomposition thermique. Cela s'explique par le fait que l'amidon de manioc a une forte teneur en matière volatile (~ 86 %) et un faible pouvoir calorifique (~ 16,5 $MJ.kg^{-1}$) comparativement à la gomme arabique (17,26 $MJ.kg^{-1}$) et à la mélasse (17,5 $MJ.kg^{-1}$). Par ailleurs, les briquettes produites avec la mélasse ont présenté les plus grandes valeurs de densité apparente et de densité énergétique et celles produites à partir de la gomme arabique ont présenté la résistance à la compression la plus élevée.

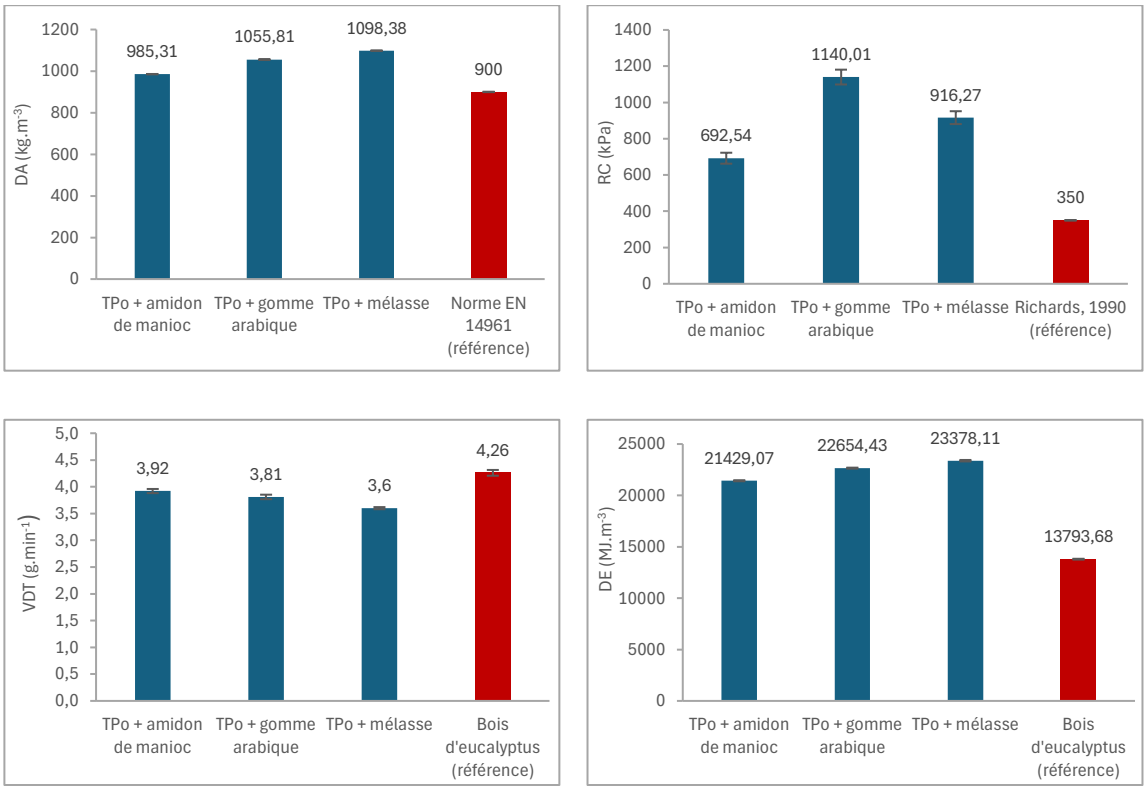


Figure 4.10. Influence du type de liant sur la densification de TPo

Par ailleurs, la Figure 4.11 présente les images MEB des biocombustibles briquettes de TPo produites avec la mélasse, la gomme arabique et l'amidon de manioc utilisés comme liants de densification. L'analyse de ces images montre que l'agglomération est plus forte dans le cas des briquettes de TPo produites avec la mélasse (a, b) et la gomme arabique (c, d) comparativement à celle des briquettes de TPo produites avec l'amidon de manioc (e, f). Ce résultat justifie le fait que ces briquettes présentent des propriétés mécaniques plus fortes que celles des briquettes produites avec le liant amidon de manioc.

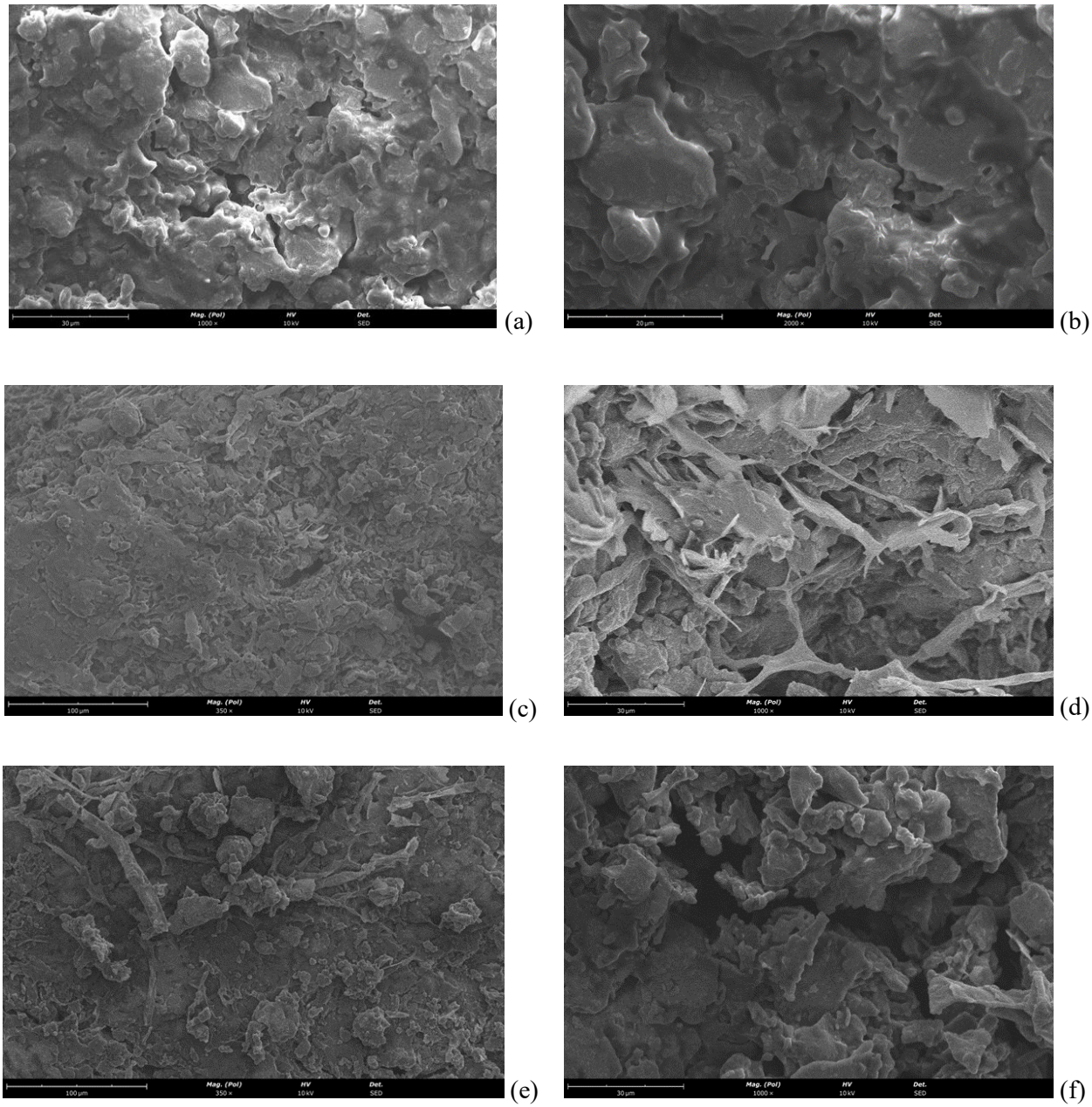


Figure 4.11. Images MEB des briquettes de TPo produites avec : (a), (b) la mélasse, (c), (d) la gomme arabique et (e), (f) l'amidon de manioc

4.2.2.3 Densification de TPo sans liant

La densification de TPo a été réalisée sans ajout de liant, sous les conditions expérimentales : pression = 18,5 kPa, taux d'humidité = 20 %, pourcentage de liant = 0 % et durée de la compression = 150 secondes. L'impact de trois fractions de TPo, à savoir $\Phi < 1,6$ mm, $\Phi < 1$ mm et $\Phi < 0,4$ mm, a été évalué sur la résistance à la compression des biocombustibles briquettes. Les résultats obtenus ont été comparés, d'une part à ceux des briquettes produites avec 12,5 % de liant, et d'autre part, avec ceux des briquettes de BBa produites dans les mêmes conditions (Figure 4.12).

Les résultats ont révélé une relation directe entre la taille des particules et la résistance à la compression des briquettes de TPo. En effet, la résistance à la compression des briquettes a significativement augmenté lorsque la taille des particules a diminué, quelles que soient les conditions de formulation des briquettes choisies. Plus précisément, lorsque la taille des particules de TPo est inférieure à 1,6 mm, voire 1 mm, les résistances à la compression des briquettes sans liant sont relativement très proches de celles produites avec la mélasse comme liant. Cependant, comme les particules de TPo sont plus fines, c'est-à-dire que $\Phi < 0,4$ mm, les briquettes produites sans liant ont présenté des résistances à la compression supérieures à celles obtenues avec 12,5 % de mélasse. Il a été observé que, quelle que soit la granulométrie des particules utilisée, tous les biocombustibles briquettes produites ont montré des résistances à la compression au moins deux fois supérieures à la valeur de référence (350 kPa) rapportée par Richards et al. [135]. Cela met en évidence une amélioration significative des propriétés physiques des briquettes de TPo par rapport à la référence lorsque la taille des particules de la biomasse densifiée diminue. Cette amélioration est particulièrement marquée lorsque la taille des particules de TPo est réduite à $\Phi < 0,4$ mm. A cette granulométrie, l'utilisation de liant n'est pas nécessaire pour obtenir des briquettes avec des résistances à la compression au moins cinq fois supérieures à la valeur de référence. Cependant, bien que ces briquettes de TPo sans liant aient présenté de grandes résistances, leurs performances mécaniques ont été inférieures à celles des briquettes de BBa produites dans les conditions similaires. Il faut également souligner que cette augmentation de la résistance à la compression de TPo avec la diminution de la taille des particules, bien qu'encourageante, entraîne des coûts supplémentaires. En effet, l'obtention des résidus, à des granulométries en dessous de $\Phi < 0,4$ mm nécessite un broyage supplémentaire, ce qui peut induire des coûts considérables. De plus, les TPo sont des biomasses qui ont été obtenues par pressage mécanique des amandes de karité et ils sont très difficiles à moudre, ce qui rend cette étape encore plus complexe. Ainsi, même si des résultats prometteurs ont été observés, il est important de prendre en compte les implications économiques liées au broyage pour évaluer la rentabilité et la faisabilité de la production à grande échelle de briquettes de TPo sans liant.

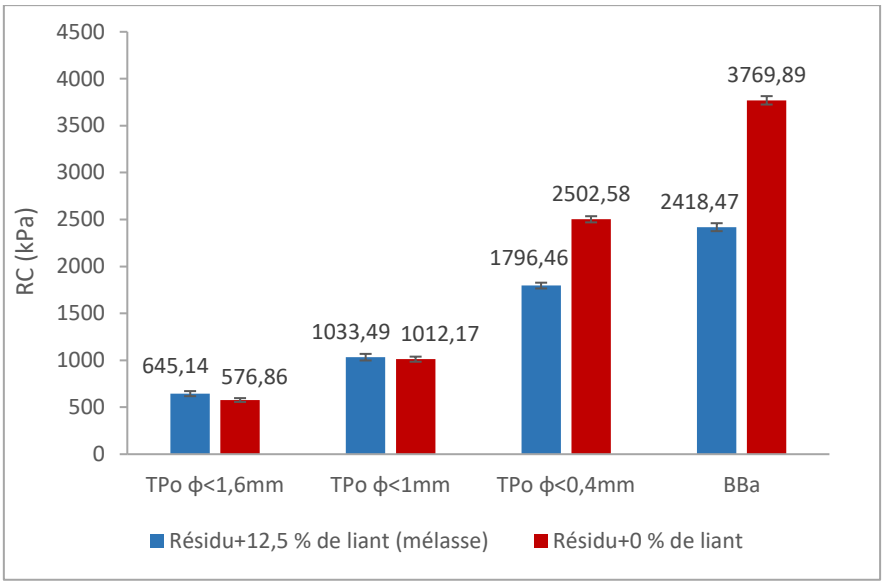


Figure 4.12. Résistances à la compression des briquettes de TPo et BBa produites avec 12,5 % de liant (mélasse) et sans liant

4.2.3 Analyse des gaz émis par la combustion des biomasses brutes BBa et TPo

Les formules brutes de BBa et de TPo obtenues à partir de la composition élémentaire de chacune de ces biomasses sont présentées dans le Tableau 4.1. Les termes α, β, γ et θ désignent les fractions molaires.

Tableau 4.1. Formules brutes et masse molaires de BBa et de TPo

Biomasse	% C	% H	% O	% N	α	β	γ	θ	Formule brute	M (g/mol), daf
BBa	58,18	5,21	33,90	2,71	0,39	0,42	0,17	0,02	$C_{0,39}H_{0,42}O_{0,17}N_{0,02}$	8,08
TPo	54,03	4,58	38,97	2,42	0,39	0,39	0,21	0,01	$C_{0,39}H_{0,39}O_{0,21}N_{0,01}$	8,55

Les relations stœchiométriques de la combustion de ces biomasses s'écrivent comme suit :

- **Boues de barattage (BBa)**

$$C_{0,39}H_{0,42}O_{0,17}N_{0,02} + 0{,}41\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow 0{,}39\ CO_2 + 0{,}21\ H_2O + 1{,}55\ N_2 \qquad (4.11)$$

- **Tourteaux de presse (TPo)**

$$C_{0,39}H_{0,39}O_{0,21}N_{0,01} + 0{,}38\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow 0{,}39\ CO_2 + 0{,}19\ H_2O + 1{,}43\ N_2 \qquad (4.12)$$

Les valeurs du débit volumique d'air pour la combustion de BBa et TPo dans les conditions stœchiométriques en fonction de la vitesse de chauffe sont consignées dans le Tableau 4.2. Ces valeurs théoriques ont été calculées pour des vitesses de chauffe du four tubulaire de 5, 10 et 20 °C.min^{-1}. Les résultats montrent que lorsque la vitesse de chauffe augmente de 5 à 20 °C.min^{-1}, le débit volumique d'air stœchiométrique passe de 0,038 à 0,143 l.min^{-1} pour BBa et de 0,031 à 0,122 l.min^{-1} pour TPo. Ainsi, le besoin en comburant pour entretenir la combustion des biomasses étudiées augmente d'environ 4 fois quand la vitesse de chauffe passe de 5 à 20 °C.min^{-1}. Sur la base de ces résultats, la combustion des biomasses brutes BBa et TPo dans le four tubulaire a été réalisée avec un débit d'air de 1,5 l.min^{-1} (pour assurer la combustion complète) et les gaz de combustion ont été analysés.

Tableau 4.2. Calculs théoriques pour la combustion de BBa et TPo bruts à 5, 10 et 20 °C.min^{-1}

Paramètres	BBa brute			TPo brut		
Vitesse de chauffe (°C.min^{-1})	5	10	20	5	10	20
$\dot{V}_{air,st}$ (l.min^{-1})	0,038	0,071	0,143	0,031	0,065	0,122

La Figure 4.13 présente les profils de concentration de O_2, CO et CO_2 en fonction de la température. L'analyse des graphes montre que la concentration maximale de CO dans les fumées de combustion varie de ~ 3000 à ~ 5022 ppm dans le cas de BBa et elle est comprise entre 1339 et 3700 ppm pour TPo quand la vitesse de chauffe passe de 5 à 20 °C.min^{-1}. De plus, lorsque la vitesse de chauffe augmente, la consommation de O_2 augmente également quelle que soit la biomasse considérée et il y a un décalage des pics vers les températures élevées. Ce décalage des pics vers les fortes températures a aussi été observé avec CO et CO_2. L'augmentation de la concentration de CO dans les gaz de combustion est liée au fait que lorsque la vitesse de chauffe est élevée, la biomasse se décompose rapidement et une quantité plus élevée d'air est requise par unité de temps pour entretenir la combustion de la biomasse, ce qui entraîne une forte consommation de O_2. Par ailleurs, il est à noter que les hydrocarbures HC n'ont pas été détectés dans les gaz de combustion de BBa et TPo bruts.

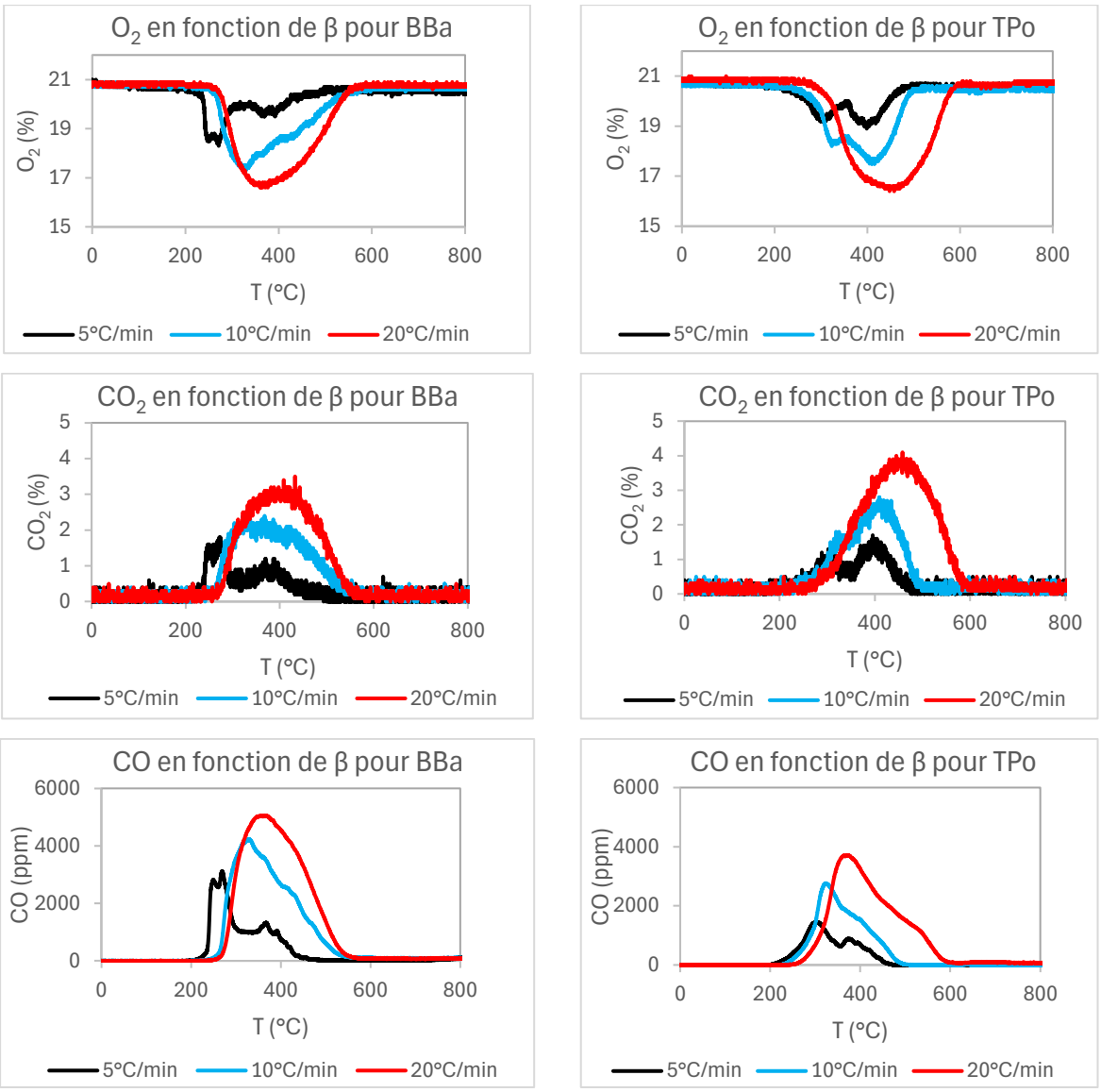


Figure 4.13. Composition des gaz de combustion en termes de O_2, CO_2 et CO aux vitesses de chauffe de 5, 10 et 20 °C.min^{-1}

4.2.4 Analyse des gaz émis par la combustion des biocombustibles briquettes de BBa et TPo

Les valeurs des débits volumiques d'air nécessaires pour la combustion des briquettes de BBa et de TPo dans les conditions stœchiométriques calculées à partir de l'équation (4.5) sont consignées dans le Tableau 4.3. Ce calcul théorique a permis d'estimer l'excès d'air nécessaire pour assurer la combustion complète des briquettes de BBa et TPo dans le foyer à combustion. Dans cette partie, les vitesses de décomposition thermique des briquettes obtenues par combustion dans le four à moufle (voir partie « optimisation de la densification ») ont été utilisées comme débits massiques. En considérant le débit volumique d'air dans les conditions

stœchiométriques, les calculs ont été effectués pour assurer la combustion des briquettes de BBa et de TPo avec un excès d'air de 100 et 150 %. Les débits volumiques correspondants sont également présentés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3. Calculs théoriques pour la combustion des briquettes de BBa et TPo

Biomasse	Débit massique $\dot{m}$ (kg.min^{-1})	Débit vol. d'air stœchio. $\dot{V}$ (l.min^{-1})	Débit vol. à 100 % excès d'air (l.min^{-1})	Débit vol. à 150 % excès d'air (l.min^{-1})
Briquette de BBa	0,004	23,2	46,4	58
Briquette de TPo	0,003	18,0	45	54

La combustion des briquettes de BBa et TPo a été réalisée dans le dispositif de combustion présenté dans la section 4.1.2 et les gaz émis ont été analysés en termes de O_2, CO_2, CO, NOx et HC. Il a été observé que le temps d'allumage des briquettes de BBa (~ 18 minutes) était légèrement inférieur à celui des briquettes de TPo (~ 20 minutes). Les résultats présentés par la Figure 4.14 montrent une similarité en termes d'émission de gaz pour la combustion des briquettes de BBa et de TPo. Près de 9 % de O_2 se retrouve dans les gaz de combustion de ces briquettes du fait qu'elles aient été brûlées avec un excès d'air (combustion pauvre). De plus, la valeur maximale de NOx atteint 296 ppm dans le cas de la combustion des briquettes de TPo (Figure 4.14 (b)) contre 284 ppm pour les briquettes de BBa (Figure 4.14 (a)). Ainsi, la concentration maximale de NOx dans les fumées de combustion des briquettes de TPo est légèrement supérieure à celle détectée dans les fumées de combustion des briquettes de BBa bien que la teneur en azote de BBa (% N ~ 2,71) soit légèrement plus grande que celle de TPo (% N ~ 2,42). Ce résultat s'explique par la présence d'environ 0,39 % d'azote dans la mélasse utilisée comme liant de densification de TPo [144]. L'azote de la mélasse se serait donc oxydé pour produire des NOx supplémentaires. Les hydrocarbures HC n'ont pas été détectés dans les gaz de combustion des briquettes de BBa et de TPo.

Par ailleurs, les profils de température liés à la combustion des briquettes de BBa et de TPo sont présentés par la Figure 4.14 (c). L'analyse de ces graphes montre que la température maximale atteinte lors de la combustion des briquettes de BBa (~ 600 °C) est supérieure à celle des briquettes de TPo (~ 576 °C). Il en résulte que les briquettes de BBa ont libéré une quantité de chaleur plus élevée pendant la combustion que celle libérée par les briquettes de TPo. Ce

résultat est corroboré par le fait que le PCS des briquettes de BBa (26,5 $MJ.kg^{-1}$) est plus élevé comparativement à celui des briquettes de TPo (21,28 $MJ.kg^{-1}$).

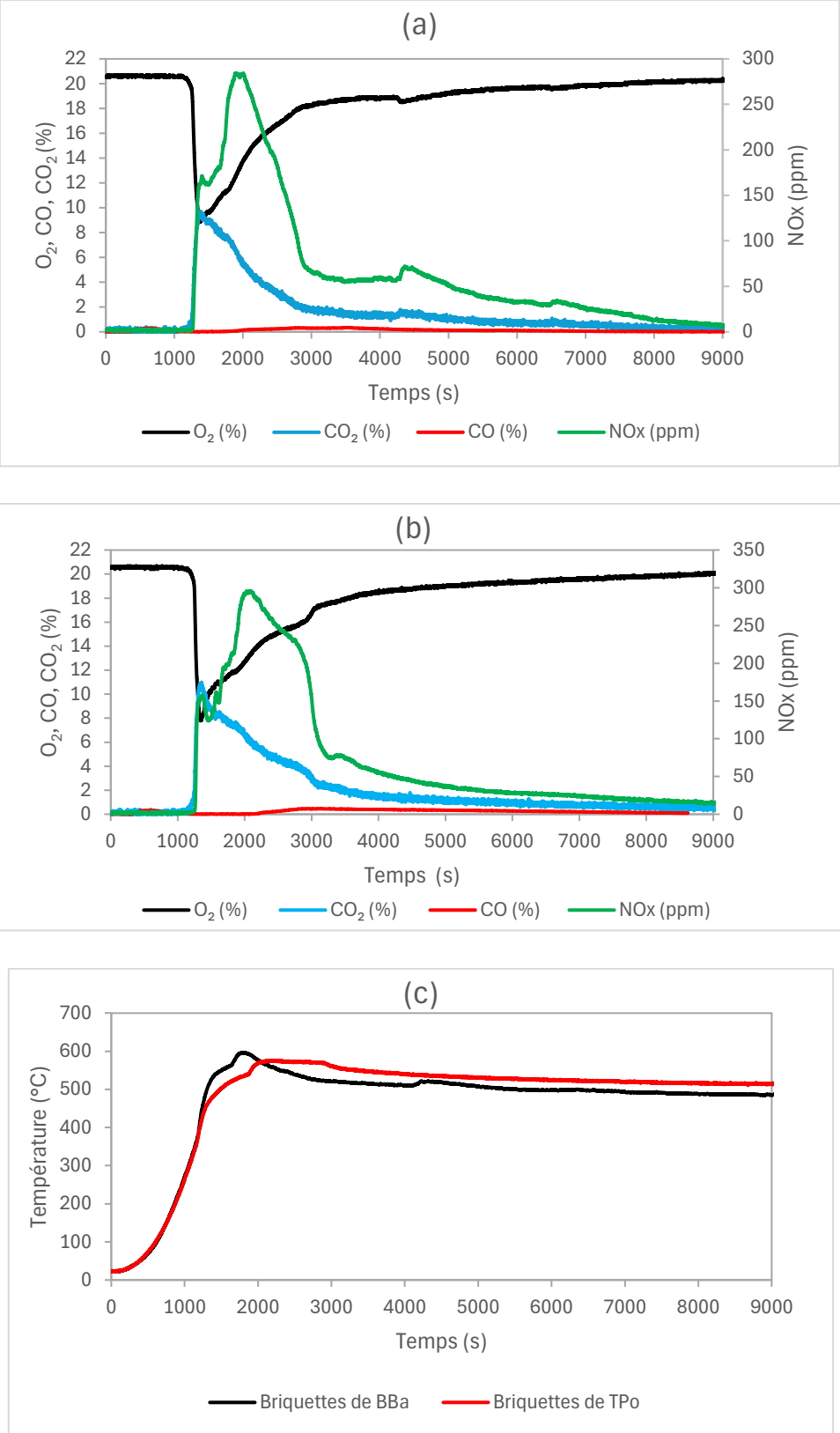


Figure 4.14. Analyse en continu des gaz émis par la combustion des briquettes de (a) BBa et (b) TPo et (c) évolution de la température

4.2.5 Influence de l'excès d'air sur les émissions de CO et NOx lors de la combustion des briquettes de BBa

L'influence de l'excès d'air sur les émissions de CO et NOx par la combustion des briquettes de BBa a été étudiée en considérant les décompositions thermiques à 100 et 150 % d'excès d'air.

4.2.5.1 Cas des émissions de CO

Les graphes de l'analyse en continu des gaz de combustion en termes de CO sont présentés par la Figure 4.15. Les résultats montrent qu'au cours des 20 à 25 premières minutes de combustion des briquettes, la concentration de CO dans les gaz de combustion augmente jusqu'à atteindre 2700 ppm (0,27 %) pour 150 % d'excès d'air et 6000 ppm (0,60 %) dans le cas de 100 % d'excès d'air. La combustion avec un excès d'air de 150 % a donc contribué à réduire de plus de 50 % la concentration de CO dans les gaz de combustion.

En effet, la formation de CO en début de combustion s'explique par la libération des matières volatiles contenues dans la briquette (dévolatilisation). Ces matières volatiles se décomposent ensuite et libèrent du monoxyde de carbone (CO) qui s'oxyde en dioxyde de carbone (CO_2) sous l'effet de la pénétration de l'air dans la chambre de combustion. Cela se matérialise par une diminution soudaine de la concentration de O_2 et de CO, une augmentation du pourcentage de CO_2 puis une perte de masse importante de la briquette. Cette phase du processus représente la combustion en phase homogène (phase gazeuse) des briquettes et s'accompagne d'une flamme jaune intense (Figure 4.16 (a)) qui indique une importante libération d'énergie, d'où l'augmentation de la température dans la chambre de combustion.

En considérant les hydrogènes de H_2O, l'oxydation du CO en CO_2 peut être décrite par les quatre étapes suivantes [145] :

$$CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O^{\cdot} \quad (4.13)$$

$$O^{\cdot} + H_2O \rightarrow OH^{\cdot} + OH^{\cdot} \quad (4.14)$$

$$CO + OH^{\cdot} \rightarrow CO_2 + H^{\cdot} \quad (4.15)$$

$$H^{\cdot} + O_2 \rightarrow OH^{\cdot} + O^{\cdot} \quad (4.16)$$

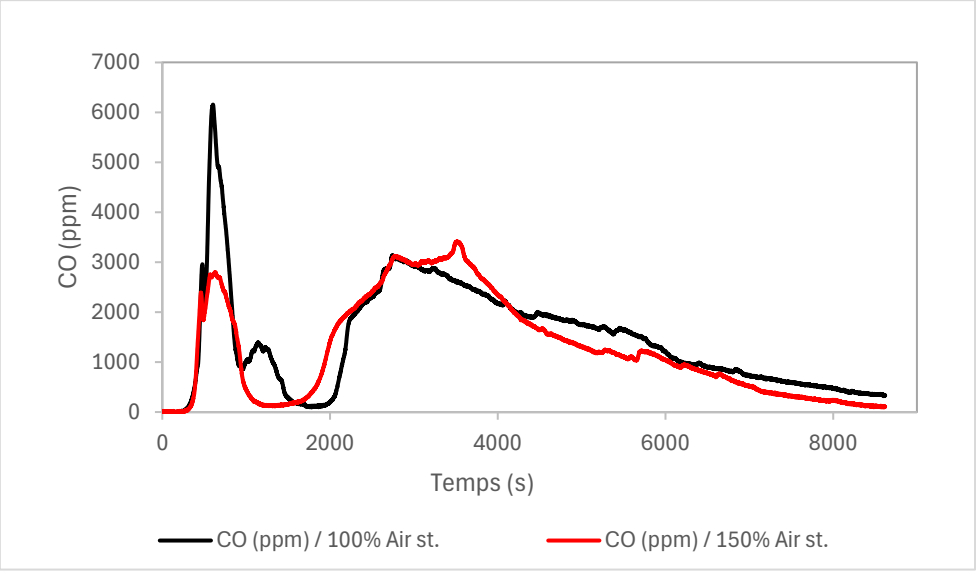


Figure 4.15. Evolution de la concentration de CO dans les gaz de combustion des briquettes de BBa à 100 et 150 % d'excès d'air

Au bout de 30-35 minutes à partir du début de la combustion des briquettes, la flamme intense et visible disparaît (Figure 4.16 (b)) et la concentration de CO recommence à augmenter progressivement (Figure 4.15). Elle atteint un autre maximum (~ 3000 ppm) après 50 minutes quel que soit le débit d'air excédentaire et malgré la concentration relativement élevée de O_2 (~16-18 %) dans les gaz de combustion. Cette période coïncide avec une baisse de la température dans la chambre de combustion pour se stabiliser à environ 500 °C ; elle se caractérise principalement par l'oxydation du biochar : c'est l'étape de combustion en phase hétérogène (phase solide-gazeuse). Enfin, au bout de 60 minutes, la concentration de CO diminue progressivement jusqu'à la fin de la combustion.

(a)

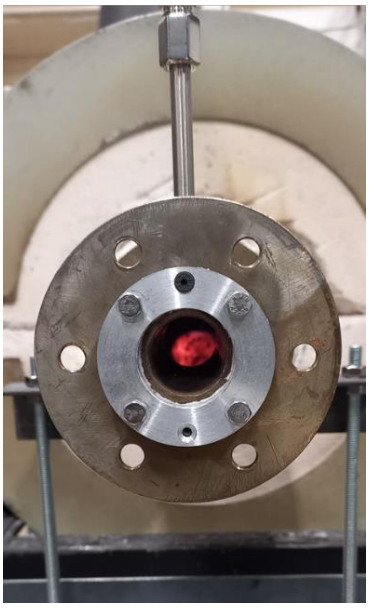

(b)

Figure 4.16. Combustion en (a) phase homogène et en (b) phase hétérogène des briquettes de BBa

4.2.5.2 Cas des émissions de NOx

La quantité de NOx libérée durant la combustion des briquettes atteint un maximum d'environ 274 ppm à 100 % d'excès d'air et ~ 284 ppm lorsque ce dernier est de 150 %. L'augmentation de l'excès d'air de 100 à 150 % n'a pas significativement affecté la concentration de NOx dans les gaz de combustion. On pourrait donc en conclure que les NOx libérés proviennent essentiellement de l'oxydation de l'azote contenu dans la biomasse. En effet, la formation des NOx au cours de la combustion suit essentiellement trois mécanismes réactionnels : thermique (ou de Zeldovich), prompt (ou Fenimore) et conversion de N-combustible. Le mécanisme thermique (ou de Zeldovich) est prédominant à des températures supérieures à 1500 °C ; il est généralement sans importance à des températures en deçà de cette valeur [145]. Le mécanisme prompt porte sur la réaction entre les radicaux -CH· et l'azote atmosphérique dans un environnement pauvre en oxygène [146,147]. Le mécanisme de N-combustible est le plus dominant dans la formation des NOx au cours de la combustion de la biomasse à cause des conditions de températures défavorables pour les deux premiers mécanismes.

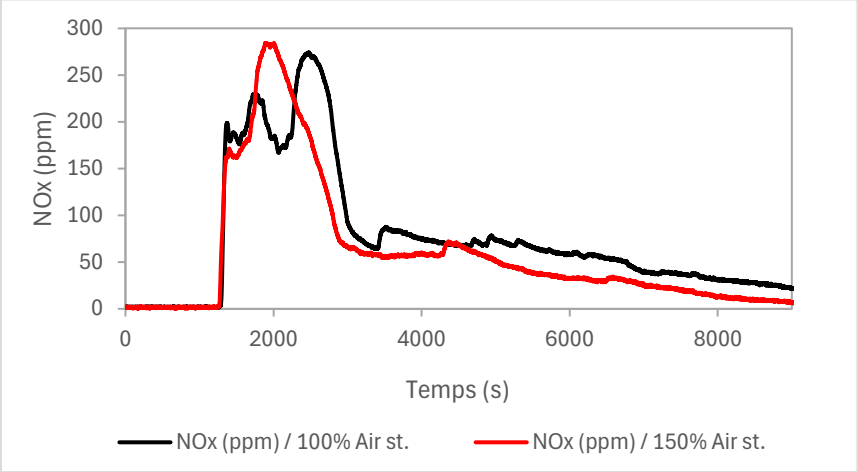


Figure 4.17. Evolution de la concentration des NOx dans les gaz de combustion des briquettes de BBa en fonction de l'excès d'air

4.2.6 Normalisation et conversion de la concentration des NOx émis

La concentration des NOx a été normalisée à la teneur volumique en oxygène (O_{2ref}) de 6 % dans les gaz de combustion des briquettes telle que recommandée par la directive (EU) 2015/2193 de l'Union Européenne [148]. De plus, une conversion de ppm @6%O_2 en mg/Nm^3 @6%O_2 a été réalisée afin de pouvoir comparer les résultats avec les limites d'émission fixées par les législations. Ces calculs ont été effectués à travers les équations (4.17) et (4.18) :

$$NO_X(ppm\ @6\%O_2) = NO_{X\ mesuré} \times \frac{21-O_{2\ ref}}{21-O_{2\ mesuré}} \quad (4.17)$$

$$NO_X(mg/Nm^3@6\%O_2) = NO_X\ (ppm@6\%O_2) \times \frac{M_{NO_X}}{V_m} \quad (4.18)$$

Où :

$NO_{X\ mesuré}$ représente la concentration des NO_X issue du gaz de combustion, en (ppm)

O_{2ref} est la concentration de référence de l'oxygène, 6 % ici

$O_{2mesuré}$ est la concentration d'oxygène mesurée au cours de l'expérience, en (%)

M_{NO_X} représente la masse molaire des NO_X (NO et NO_2), en ($g.mol^{-1}$)

V_m est le volume molaire, 22412 Nm^3/mol (CNTP)

Dans la présente étude, les calculs relatifs aux NOx ont été effectués pour NO et NO_2

Les valeurs moyennes de la concentration des NOx relatives à la combustion à 150 % d'excès d'air des briquettes de BBa et de TPo ont été comparées à celles du bois d'eucalyptus (Tableau 4.4). Les résultats ont montré que les émissions de NOx de la combustion des briquettes de BBa (~ 608 mg/Nm^3 @6%O_2) et de TPo (~ 569 mg/Nm^3 @6%O_2) sont conformes à la limite recommandée par la Directive (EU) 2015/2193 de l'Union Européenne (650 mg/Nm^3 @6%O_2) [148]. En outre, les concentrations de NOx détectées dans les fumées de combustion des briquettes de BBa et de TPo sont supérieures à celles détectées dans les fumées de combustion du bois d'eucalyptus. Ce résultat s'explique par la très faible teneur en azote du bois d'eucalyptus (% N ~ 0,1) comparativement à celles de BBa et TPo.

Tableau 4.4. NOx moyen émis exprimé en ppm et en mg/Nm^3, normalisé à 6 % O_2

	NOx (ppm @6%O_2)	NOx mesuré exprimé en NO (mg/Nm^3 @6%O_2)	NOx mesuré exprimé en NO_2 (mg/Nm^3 @6%O_2)
Briquettes de BBa	296,30	396,62	608,16
Briquettes de TPo	277,09	370,91	568,72
Bois d'eucalyptus	187,14	250,50	384,10
Emission limite de NOx exprimé en NO_2 dans l'UE (mg/Nm^3 @6%O_2)	-	-	650

4.2.7 Influence du type de liant sur la concentration de NOx émis

L'influence du type de liant sur l'émission de NOx a été étudiée à travers la combustion des briquettes de TPo produites avec la mélasse, la gomme arabique et l'amidon de manioc utilisés comme liants. La combustion de ces briquettes a été effectuée avec 150 % d'excès d'air et les gaz de combustion ont été analysés en termes de NOx. La Figure 4.18 présente l'évolution de la concentration de NOx dans les fumées de combustion exprimée en ppm en fonction du temps de combustion. L'analyse des graphes montre une similarité du profil des polluants NOx avec des valeurs maximales atteintes après 33 minutes de combustion. Les valeurs moyennes de la concentration de NOx dans les fumées de combustion sont d'environ 77, 82 et 65 ppm pour les briquettes produites avec la mélasse, la gomme arabique et l'amidon de manioc respectivement. La valeur légèrement élevée obtenue pour les briquettes produites avec la gomme arabique pourrait s'expliquer par la teneur en azote de cette dernière qui est légèrement supérieure à celles de la mélasse et de l'amidon de manioc [149].

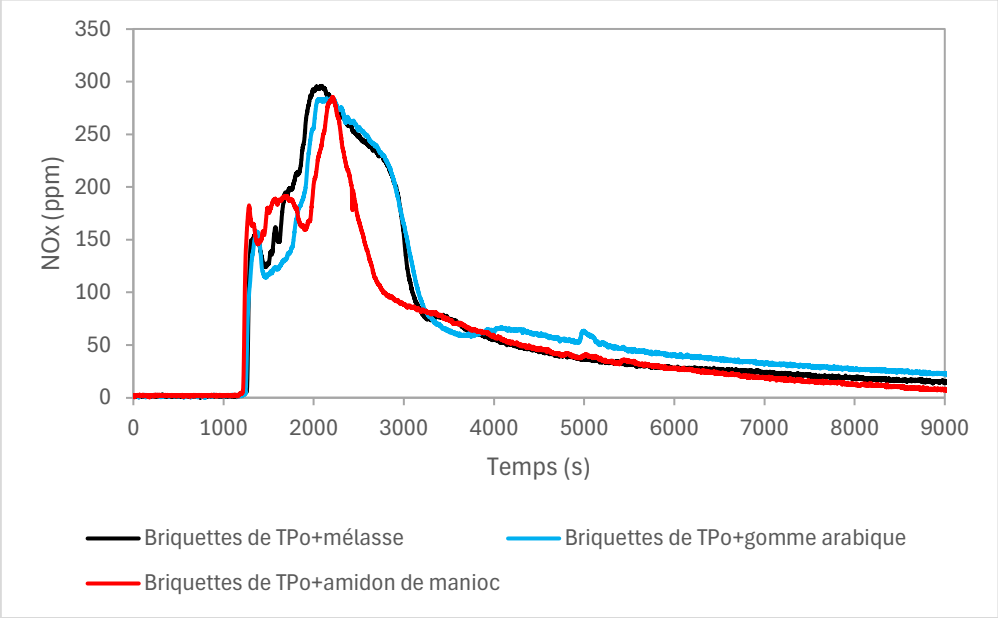


Figure 4.18. Influence du type de liant sur l'émission des NOx

Le Tableau 4.5 présente les valeurs moyennes normalisées de NOx en ppm @6 %O_2 et en mg/Nm^3 @6 %O_2. Dans ces conditions, les briquettes de TPo+gomme arabique ont présenté une valeur d'émission de NOx exprimée en termes de NO_2 (~ 722 mg/Nm^3 @6 %O_2) supérieure à la limite recommandée par la Directive (EU) 2015/2193 de l'Union Européenne (650 mg/Nm^3 @6%O_2) [148]. Cependant, les valeurs d'émission de NOx relatives à la combustion des briquettes de TPo+mélasse et TPo+amidon de manioc ont été inférieures à la limite de cette directive. Bien que la concentration de NOx en termes de NO_2 dans les fumées de combustion

des briquettes de TPo+gomme arabique (722,31 mg/Nm^3) soit supérieure à la limite imposée par la directive de l'UE, elle reste dans la gamme de valeurs trouvées par Nussbaumer et Hustad (300-800 mg/Nm^3) lors de la combustion des biomasses telles que la paille et les résidus du miscanthus [150].

Tableau 4.5. NOx moyen émis exprimé en ppm et mg/Nm^3 normalisés à 6 % O_2 pour la combustion des briquettes de TPo produites avec différents liants

	NOx (ppm @6%O_2)	NOx mesuré exprimé en NO (mg/Nm^3 @6%O_2)	NOx mesuré exprimé en NO_2 (mg/Nm^3 @6%O_2)
Briquettes de TPo+mélasse	277,09	370,91	568,72
Briquettes de TPo+gomme arabique	351,92	471,07	722,31
Briquettes de TPo+amidon de manioc	277,53	371,50	569,62
Emission limite de NOx exprimé en NO_2 dans l'UE (mg/Nm^3 @6%O_2)	-	-	650

4.2.8 Quantité de bois sauvegardée et gain en CO_2

Les différents calculs effectués à partir des équations 4.6 à 4.10 ont conduit aux résultats présentés dans le Tableau 4.6. Ces résultats ont été obtenus en considérant que le Burkina Faso produit chaque année 400 000 tonnes d'amandes de karité tel qu'annoncée par la Banque Africaine de développement en 2020. Il a également été supposé que la totalité des amandes de karité produite soit transformée au Burkina Faso et que les boues de barattage représentent 2/3 de la quantité totale de résidus. De plus, selon Iddrisu et al. [7], les résidus représentent environ 45 à 60 % de la masse de l'amande de karité. Ainsi, nous avons considéré que les tourteaux de karité représentent 50 % de la masse des amandes de karité ; le RPR est donc de 0,5. En outre, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) suggère que si un résidu est collecté dans un champ, 25 % de ce résidu y soit laissé en revanche lorsqu'il est collecté au niveau du lieu de transformation, la totalité peut être mobilisée [151]. Au niveau des PME productrices de beurre de karité, les boues de barattage étant humides, elles ne sont pas totalement récupérables. Nous avons considéré , une fraction mobilisable de 95 % c'est-à dire que $\alpha = 0,95$. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.6. L'utilisation de toute la quantité annuelle de boues de barattage générée au Burkina Faso sous formes de biocombustibles briquettes permettrait de sauvegarder l'équivalent de 187 517 tonnes de bois chaque année. De plus, les PME de transformation des amandes de karité pourraient réduire

leur empreinte carbone annuelle de près de 337 530 tonnes de CO_2. L'utilisation des tourteaux de presse sous forme de biocombustibles briquettes conduirait à la sauvegarde de 77 571 à 79 285 tonnes de bois chaque année au Burkina Faso. Ces résultats démontrent que la valorisation des résidus de transformation des amandes de karité pourrait contribuer à la préservation du couvert forestier du Burkina Faso.

Tableau 4.6. Quantité de bois sauvegardée et gain en CO_2 par usage des briquettes de BBa et TPo

Type	P_a (t)	Q_t (t)	Q_m (t)	Q_{bri} (t)	E_{an} (kWh)	$(Bois)_{éq}$ (t)	$(CO_2)_{éq}$ (t)
Briquette de BBa	400 000	133 333	126 667	130 625	961 545 139	187 517	337 530
Briquette de TPo+mélasse	400 000	66 667	63 333	67 292	397 768 518	77 571	139 628
Briquette de TPo+gomme arabique	400 000	66 667	63 333	67 292	401 133 102	78 227	140 809
Briquette de TPo+amidon de manioc	400 000	66 667	63 333	67 292	406 553 819	79 285	142 712

4.2.9 Analyse financière

L'analyse financière a été effectuée afin déterminer si la production de biocombustibles briquettes à partir des résidus de transformation des amandes de karité est économiquement viable dans le contexte du Burkina Faso. Deux cas ont ainsi été considérés. Le premier cas a porté sur la production de briquettes de boues de barattage sans liant avec 12 % de taux d'humidité de la biomasse à densifier (briquette optimisée de BBa). Le second cas était relatif à la production de briquettes de tourteaux de presse avec 10 % de liant et un taux d'humidité de la biomasse à densifier de 18 % (briquette optimisée de TPo). Les briquettes considérées dans les deux cas susmentionnés concernent les meilleures formulations obtenues à partir des résultats de l'optimisation de la densification. Pour chacun des deux cas, deux scénarios ont été considérés : le premier scénario a concerné une PME disposant de ses propres résidus et qui décide de les transformer en biocombustibles briquettes par usage d'une presse à briquettes locale ayant une capacité de production de 6 $kg.h^{-1}$ (presse à piston). Le deuxième scénario a concerné une autre PME qui achète les résidus pour produire des biocombustibles briquettes à partir du même type de presse locale. Nous avons considéré que ces deux PME disposent déjà

d'un local comprenant un bac de stockage des résidus et un magasin de stockage des briquettes produites. L'horizon du projet a été fixé à 10 ans.

4.2.9.1 Cas 1 : production de biocombustibles briquettes à partir de BBa

- **Investissement initial**

L'investissement initial concerne les coûts liés à l'acquisition de la presse à densifier locale munie d'un cadrant de 4 pistons ayant une capacité de production totale de 6 $kg.h^{-1}$; d'un broyeur de 50 $kg.h^{-1}$; de 4 moules de rechange, de 2 brouettes et pelles puis d'autres accessoires (pots, bassines, etc.). Tous ces équipements peuvent être acquis localement et les prix ont été estimés à travers des échanges avec des fournisseurs locaux. Le Tableau 4.7 montre que le montant de l'investissement initial est de **1 652 000 F CFA** toutes taxes comprises.

Tableau 4.7. Investissement initial suivant le scénario 1

Désignation	**Quantité**	**Prix unitaire (F CFA)**	**Prix total (F CFA)**
Presse à briquette	1	885 000	885 000
Broyeur	1	600 000	600 000
Moule	4	25 000	100 000
Brouette	2	25 000	50 000
Pelle	2	3 500	7 000
Autres accessoires	1	10 000	10 000
Total			**1 652 000**

- **Dotation aux amortissements**

Les dotations annuelles aux amortissements des différents équipements sont présentées dans le Tableau 4.8. La durée de vie de la presse à briquette, du broyeur et des moules a été fixée à 10 ans. Ainsi, la somme totale destinée aux amortissements des équipements s'élève à **1 719 000 F CFA** à l'horizon du projet.

Tableau 4.8. Dotation aux amortissements

Désignation	**Durée de vie (an)**	**Montant d'investissement (F CFA)**	**Amortissement (F CFA/an)**	
Presse à briquette	10	885 000	88 500	
Broyeur	10	600 000	60 000	
Moule	10	100 000	10 000	
Brouette	5	50 000	10 000	
Pelle	5	7000	1 400	
Autres accessoires	5	10 000	2 000	
Total annuel		1 652 000	171 900	
Total horizon du projet (F CFA)				**1 719 000**

- **Charges de fonctionnement et d'exploitation**

Le Tableau 4.9 présente les charges de fonctionnement et d'exploitation pour le cas 1. La consommation électrique est relative à celle du broyeur de la biomasse de puissance 1,5 kW. Le prix d'achat du kilogramme de boues de barattages secs est supposé égal à celui du kilogramme de bois à Ouagadougou, c'est-à dire 80 F CFA. La charge liée au transport a été fixée à 5 % du prix d'achat total de la biomasse. La PME va également recruter un ouvrier supplémentaire payé à 200 F CFA/h [152] soit 32 000 F CFA par mois, en considérant qu'il travaille 8h par jour du lundi au vendredi. Dans ces conditions, les charges de fonctionnement et d'exploitation à l'horizon du projet s'élèvent à **3 489 210** et **10 437 920 F CFA** respectivement pour le scénario 1 et le scénario 2.

Tableau 4.9. Charges de fonctionnement et d'exploitation du cas 1

Scénario 1: la PME dispose de ses propres boues de barattage			
Désignation	**Horizon du projet (an)**	**Montant annuel (F CFA)**	**Montant à l'horizon du projet (F CFA)**
Boues de barattage	10	0	0
Transport des boues de barattage	10	0	0
Eau	10	1008	10 080
Entretien et calibrage de la presse	10	50 000	500 000
Ouvrier	10	256 000	2 560 000
Consommation électrique	10	35 071	350 710
Imprévus	10	8 922	89 220
Total		**348 921**	**3 489 210**
Scénario 2 : la PME achète les boues de barattage			
Désignation	**Horizon du projet (an)**	**Montant annuel (F CFA)**	**Montant à l'horizon du projet (F CFA)**
Boues de barattage	10	648 806	6 488 064
Transport des boues de barattage	10	32 440	324 400
Eau	10	1008	10 080
Entretien et calibrage de la presse	10	50 000	500 000
Ouvrier	10	256 000	2 560 000
Consommation électrique	10	35 071	350 710
Imprévus	10	20 979	209 785
Total		**1 043 792**	**10 437 920**

❖ Prix de revient du kilogramme de briquette de BBa

Le prix de revient d'un kilogramme de briquettes de boues de barattage est de **62 F CFA** dans le scénario où la PME dispose de ses propres biomasses. Cependant, si une PME indépendante achète des boues de barattage pour produire des biocombustibles briquettes, le prix de revient du kilogramme de ces briquettes est de **145 F CFA** (scénario 2) tel qu'indiqué dans le Tableau 4.*10*. Ces montants ont été obtenus en considérant une presse à briquette manuelle acquise localement et ayant une capacité de production de 6 $kg.h^{-1}$. La charge de travail est de 8h par jour et la production s'étend sur 8 mois par année.

Tableau 4.10. Prix de revient d'un kilogramme de briquette de BBa

Scénario 1 : la PME dispose de ses propres boues de barattage		
Désignation	**Unité**	**Total sur 10 ans**
Dotations aux amortissements	(F CFA)	1 719 000
Charges d'exploitation	(F CFA)	3 489 210
Masse de briquette	(kg)	83 635,2
Prix de revient du kg de briquette	**(F CFA)**	**62**
Scénario 2 : la PME achète les boues de barattage		
Désignation	**Unité**	**Total sur 10 ans**
Dotations aux amortissements	(F CFA)	1 719 000
Charges d'exploitation	(F CFA)	10 437 920
Masse de briquette	(kg)	83 635,2
Prix de revient du kg de briquette	**(F CFA)**	**145**

❖ Estimation du prix de vente du kilogramme de briquette de BBa

Une estimation du prix de vente du kilogramme de briquette de boues de barattage a été faite en considérant le fait que la stère de bois de chauffe équivalent à 500 kg est vendue à environ 40 000 F CFA à Ouagadougou selon nos enquêtes dans certaines PME. Ainsi, sachant que le pouvoir calorifique supérieur du bois (bois d'eucalyptus) est de 18,46 $MJ.kg^{-1}$ et celui des briquettes de boues de barattage est de 26,5 $MJ.kg^{-1}$, le prix de vente théorique du kilogramme de briquettes de boues de barattage est d'environ 115 F CFA. Dans ces conditions, la PME qui transforme ses propres boues de barattage réalise un gain de 53 F CFA sur chaque kilogramme de briquette vendu ou utilisé en remplacement du bois de chauffe. Cependant, la PME

indépendante qui achète des boues de barattage pour la production de briquettes à petite échelle réalise une perte de 30 F CFA par kilogramme de briquette.

Tous les détails des calculs sont présentés en annexes (annexes 1, 2 et 3).

4.2.9.2 Cas 2 : production de briquettes à partir de TPo

Le coût de l'investissement initial (1 652 000 F CFA) ainsi que les dotations aux amortissements (1 719 000 F CFA) sont identiques à ceux déjà déterminés pour le cas 1. Le présent cas intègre en revanche, les coûts de l'achat de la mélasse (liant de densification) au niveau des charges de fonctionnement et d'exploitation.

- **Charges de fonctionnement et d'exploitation**

Les charges de fonctionnement et d'exploitation relatives au scénario 1 dans lequel la PME dispose de ses propres tourteaux de presse et au scénario 2 concernant une PME qui achète les tourteaux de presse pour produire des biocombustibles briquettes sont présentées dans le Tableau 4.11. Il a été supposé que le prix d'achat d'un kilogramme de tourteaux de presse soit de 80 F CFA avec une charge de transport fixée à 5 % du montant total déboursé pour l'achat de ces tourteaux de presse. De plus, nous avons considéré que la PME recrutera un ouvrier supplémentaire rémunéré à 200 F CFA/h [152] soit 32 000 F CFA par mois, en considérant qu'il travaille 8h par jour du lundi au vendredi. Ainsi, les montants relatifs aux charges de fonctionnement et d'exploitation à l'horizon du projet s'élèvent à **4 680 110 F CFA** et **11 628 830 F CFA** respectivement pour le scénario 1 et le scénario 2.

Tableau 4.11. Charges de fonctionnement et d'exploitations du cas 2

Scénario 1: la PME dispose de ses propres tourteaux de presse			
Désignation	**Horizon du projet (an)**	**Montant annuel (F CFA)**	**Montant total (F CFA)**
Tourteaux de presse	10	0	0
Transport des tourteaux de presse	10	0	0
Liant : mélasse	10	115 858	1 158 583
Eau	10	1 175	11 753
Entretien et calibrage de la presse	10	50 000	500 000
Ouvrier	10	256 000	2 560 000
Consommation électrique	10	35 801	358 008
Imprévus	10	9 689	96 887
Total		**468 011**	**4 680 110**
Scénario 2 : la PME achète les tourteaux de presse			
Désignation	**Horizon du projet (an)**	**Montant annuel (F CFA)**	**Montant total (F CFA)**
Tourteaux de presse	10	648 806	6 488 064
Transport des tourteaux de presse	10	32 440	324 403
Liant : mélasse	10	115 858	1 158 583
Eau	10	1 175	11 754
Entretien et calibrage de la presse	10	50 000	500 000
Ouvrier	10	256 000	2 560 000
Consommation électrique	10	35 801	358 008
Imprévus	10	23 314	233 136
Total		**1 162 883**	**11 628 830**

❖ Prix de revient du kilogramme de briquette de TPo

Les prix de revient des briquettes de tourteaux de presse conformément aux calculs effectués sont présentés dans le Tableau 4.12. Il est de **74 F CFA** dans le scénario 1 et de **155 F CFA** dans le scénario 2. Ces montants sont légèrement supérieurs à ceux obtenus pour les briquettes de boues de barattage du fait de l'achat du liant de densification (mélasse) dont le prix du bidon de 20 l est de 4 000 F CFA. A l'horizon du projet, ce sont environ 86 tonnes de briquettes qui sont produites soient ~ 8,6 tonnes de briquettes produites chaque année.

Tableau 4.12. Prix de revient d'un kilogramme de briquette de TPo

Scénario 1 : la PME dispose de ses propres tourteaux de presse		
Désignation	**Unité**	**Total sur 10 ans**
Dotations aux amortissements	(F CFA)	1 719 000
Charges d'exploitation	(F CFA)	4 680 110
Masse de briquette	(kg)	86 169,6
Prix de revient du kg de briquette	**(F CFA)**	**74**
Scénario 2 : la PME achète les tourteaux de presse		
Désignation	**Unité**	**Total sur 10 ans**
Dotations aux amortissements	(F CFA)	1 719 000
Charges d'exploitation	(F CFA)	11 628 830
Masse de briquette	(kg)	86 169,6
Prix de revient du kg de briquette	**(F CFA)**	**155**

❖ Estimation du prix de vente du kilogramme de briquette de TPo

L'estimation du prix de vente d'un kilogramme de briquette de tourteaux de presse a été faite en considérant le prix d'un stère de bois de chauffe (40 000 F CFA), le pouvoir calorifique supérieur de la briquette de tourteaux de presse (21,8 $MJ.kg^{-1}$) et celui du bois d'eucalyptus (18,46 $MJ.kg^{-1}$). Le prix de vente théorique du kilogramme de briquette de tourteaux de karité est d'environ 94 F CFA. Ainsi, la PME qui transforme ses propres tourteaux de presse réalise un gain de 20 F CFA sur chaque kilogramme de briquette vendue ou utilisé en remplacement du bois de chauffe. Cependant, la PME indépendante qui achète des tourteaux de presse pour la production de briquettes réalise une perte de 61 F CFA par kilogramme de briquette.

Conclusion partielle

L'influence du type de liant, la matière grasse et la taille des particules sur la densification des tourteaux de presse (TPo) a été étudiée. Les résultats ont montré que la présence de matière grasse résiduelle dans TPo a favorisé sa densification et a contribué au maintien des liaisons interparticulaires des briquettes produites. De plus, lorsque la biomasse à densifier est constituée de particules de petites taille, les briquettes présentent de meilleures propriétés mécaniques.

Les gaz émis lors de combustion des briquettes de BBa, TPo+amidon et TPo+mélasse ont des teneurs en NOx inférieures à la limite préconisée par la directive (EU) 2015/2193 de l'Union Européenne (650 mg/Nm^3 @6%O_2). L'utilisation des boues de barattage produites au Burkina Faso sous formes de biocombustibles briquettes pourrait permettre de sauvegarder l'équivalent de 187 517 tonnes de bois chaque année.

Les prix de vente théoriques du kilogramme de briquettes de boues de barattage et de tourteaux de presse sont de 115 et 94 F CFA respectivement. Dans le cas des boues de barattage, la PME qui transforme ses propres résidus réalise un bénéfice de 4 409 841 F CFA à l'horizon du projet (10 ans) tandis que le gain est de 1 700 831 F CFA dans le cas des tourteaux de presse avec une production à petite échelle (6 $kg.h^{-1}$). Le scénario dans lequel une PME produit des biocombustibles briquettes en achetant les résidus de transformation des amandes de karité n'est pas économiquement rentable dans les deux cas.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le principal objectif de cette thèse était d'étudier, d'une part, le comportement thermochimique, et d'autre part, la valorisation énergétique en biocombustibles briquettes des boues de barattage et des tourteaux de presse provenant de la transformation des amandes de karité, afin de réduire la consommation du bois des unités de transformation agro-industrielles. Il s'agissait dans un premier temps d'évaluer l'influence de la technique d'extraction du beurre de karité sur le comportement thermochimique des résidus générés. Ensuite, étudier les effets des propriétés des résidus générés à partir des différentes méthodes de production du beurre de karité sur les caractéristiques des biocombustibles briquettes. Enfin, déterminer la composition des gaz de combustion des résidus bruts et des biocombustibles briquettes produites. Ainsi, des échantillons issus des deux techniques de transformation des amandes de karité les plus répandues en Afrique subsaharienne, à savoir le barattage et le pressage mécanique ont été collectés, y compris des échantillons déshuilés. Leur caractérisation physicochimique a révélé une très forte teneur en matière grasse résiduelle, atteignant 29 % pour les boues de barattage. Ces résidus ont des pouvoirs calorifiques supérieurs fortement dépendants du taux de matière grasse résiduelle et plus élevés (de 20,93 à 27,77 $MJ.kg^{-1}$) que celui du bois de chauffe (18,46 $MJ.kg^{-1}$). L'évolution des paramètres cinétiques de ces résidus au cours de leur combustion a été étudiée en utilisant les modèles cinétiques de Friedman, Kissinger-Akahira-Sunose et Vyazovkin. Le modèle de Friedman a présenté les meilleurs ajustements avec les données expérimentales ; il est donc le plus précis pour la détermination des paramètres cinétiques de la combustion des résidus de transformation des amandes de karité. Les résidus issus du pressage mécanique des amandes de karité, à savoir TPo ($E_{\alpha moy}$~112,55 $kJ.mol^{-1}$) et TPo.d ($E_{\alpha moy}$~116,55 $kJ.mol^{-1}$) ont présenté des valeurs d'énergie d'activation plus élevées au début de leur décomposition thermique comparativement à BBa ($E_{\alpha moy}$~107,48 $kJ.mol^{-1}$) mais ces valeurs ont graduellement diminué au fur et à mesure que la température de la combustion augmentait ; ils sont donc devenus plus réactifs, et ce, sous l'effet catalytique des éléments alcalins. Ainsi, les résultats ont montré que la réactivité thermochimique des résidus de transformation des amandes de karité a non seulement été influencée par la matière grasse résiduelle, mais également l'effet de lixiviation dû au barattage. Les résultats obtenus dans la première partie des travaux ont par ailleurs montré que quelle que soit la technique d'extraction du beurre de karité utilisée, les résidus générés ont un potentiel énergétique élevé et sont favorables à la conversion thermochimique. Cependant, pris en vrac, ces résidus ont présenté

de faibles densités apparentes, ce qui baisse leur densité énergétique volumique et rend difficile leur utilisation dans les foyers à combustion.

Ainsi, la méthodologie de surface de réponse a été utilisée pour étudier les conditions optimales de densification de ces résidus en biocombustibles briquettes. Les effets de la pression de compactage, du taux d'humidité, du ratio liant/biomasse et du temps de séjour sur la densité apparente, la résistance à la compression, la vitesse de décomposition thermique et la densité énergétique ont notamment été analysés. Les résultats ont montré que les conditions optimales de densification pour produire des briquettes qui allient à la fois de bonnes propriétés mécaniques et thermiques sont : 15 kPa de pression de compactage, 12 % de taux d'humidité, 0 % de liant et 300 s de temps de séjour pour les boues de barattage (BBa) puis 18,5 kPa, 20 %, 10 % de liant et 180 s pour les tourteaux de presse (TPo). Dans ces conditions, les briquettes produites ont présenté des propriétés mécaniques importantes, des pouvoirs calorifiques supérieurs plus élevés que ceux du bois de chauffe et de bonnes performances thermiques.

La présence de la matière grasse résiduelle a favorisé la densification de TPo par sa contribution au maintien des liaisons interparticulaires des briquettes produites. De plus, lorsque la biomasse à densifier présentait une distribution granulométrique dominée par des particules de petites tailles (< 0,4 mm), les briquettes produites avaient de meilleures propriétés mécaniques. Bien que les biomasses eussent des teneurs en azote plus de 20 fois supérieures à celui du bois de chauffe, les gaz émis lors de la combustion de leurs briquettes contenaient des teneurs en polluant NOx inférieures à la limite préconisée par la directive (EU) 2015/2193 de l'Union Européenne. La valorisation des boues de barattage produites au Burkina Faso en biocombustibles briquettes pourrait permettre au pays de sauvegarder l'équivalent de 187 517 tonnes de bois chaque année. Une PME qui produit des biocombustibles briquettes de boues de barattage à partir de ses propres résidus réalisera un bénéfice de 53 F CFA sur chaque kilogramme de briquette utilisé en remplacement au bois de chauffe tandis que le gain est de 20 F CFA dans le cas des tourteaux de presse. Dans les deux cas, le scénario où une PME indépendante achète les résidus auprès d'autres unités de transformation des amandes de karité pour produire les biocombustibles briquettes à petite échelle n'est pas économiquement rentable.

Les énergies d'activation et les facteurs pré-exponentiels de la décomposition thermique en milieu oxydant des boues de barattage, des tourteaux de presse et des tourteaux de presse déshuilés ont été déterminées à partir de l'approche isoconversionnelle. Cependant, cette dernière est basée sur le calcul de ces paramètres sans un préalable sur les mécanismes

réactionnels. Les travaux de recherche futurs pourront aborder la détermination des mécanismes réactionnels de chaque phase de décomposion thermique.

Dans la présente étude, les performances thermiques des biocombustibles briquettes produites ont été testées dans des foyers de combustion à l'échelle laboratoire et des paramètres caractéristiques ont été déterminés. Pour les travaux de recherche futurs, nous proposons que l'évaluation des performances de ces briquettes soit effectuée à grande échelle par utilisation des foyers de combustion des unités de production du beurre de karité et des chaudières industrielles.

En plus des NOx, les polluants tels que les oxydes de soufre (SOx) et les composés organiques volatils (COV) susceptibles d'être dégagés lors de la combustion des biocombustibles briquettes peuvent être nuisibles pour les usagers. Ainsi, les futures recherches devront inclure la détermination de la concentration de ces composés dans les fumées de combustion des biocombustibles briquettes produites.

En dehors des résidus de transformation des amandes de karité, la filière karité génère aussi des coques issues du décorticage des noix. Des recherches devront se pencher sur les conditions de valorisation énergétique optimales de la combinaison de ces deux types de biomasse afin que tous les résidus de la filière karité soient valorisés.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] International Energy Agency, *IEA, World Energy Statistics and Balances*, Statistic data, Paris., 2024.

[2] 'Tracking SDG 7: The Energy Progress Report'. Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.irena.org/publications/2022/Jun/Tracking-SDG-7-2022

[3] L. G. Nair, K. Agrawal, and P. Verma, 'An overview of sustainable approaches for bioenergy production from agro-industrial wastes', *Energy Nexus*, vol. 6, p. 100086, 2022, doi: 10.1016/j.nexus.2022.100086.

[4] R. Thomson, P. Kwong, E. Ahmad, and K. D. P. Nigam, 'Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 21087–21111, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.160.

[5] T. L. Acka, M. Sawadogo, T. S. Tanoh, A. Bacaoui, and I. W. K. Ouédraogo, 'Thermal decomposition of crude and de-oiled shea almond cakes: kinetic and thermodynamic characteristics study using thermogravimetric analysis', *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, doi: 10.1007/s13399-024-05407-6.

[6] A. Dao, P. Coulibaly, N. Lamien, and P. Toé, 'Demande en bois-énergie et rentabilité économique de la préparation de la bière locale et du beurre de karité au Burkina Faso', *Journal of Animal & Plant Sciences*, vol. 42(3), pp. 7303–7313, 2019, doi: https://doi.org/10.35759/JAnmPlSci.v42-3.3.

[7] A.-M. Iddrisu, 'Biochemical and microbiological analysis of shea nut cake: A waste product from shea butter processing', *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, vol. 5, pp. 61–68, Jul. 2013, doi: 10.5897/JABSD12.031.

[8] K. Slopiecka, P. Bartocci, and F. Fantozzi, 'Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis', *Applied Energy*, vol. 97, pp. 491–497, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.056.

[9] H. Lee *et al.*, 'IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.', 2023.

[10] D. K. Sarkar, 'Chapter 3 - Fuels and Combustion', in *Thermal Power Plant*, Ed., Elsevier, 2015, pp. 91–137. doi: 10.1016/B978-0-12-801575-9.00003-2.

[11] D. L. Klass, *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. Elsevier, 1998.

[12] A. Khelfa, 'Etude des étapes primaires de la dégradation thermique de la biomasse lignocellulosique', Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine - Metz, 2009.

[13] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, 'An overview of the chemical composition of biomass', *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.

[14] M. J. Prins, K. J. Ptasinski, and F. J. J. G. Janssen, 'From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency', *Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1248–1259, 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.07.017.

[15] P. Bajpai, 'Pretreatment of Lignocellulosic Biomass', in *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*, P. Bajpai, Ed., Singapore: Springer, 2016, pp. 17–70. doi: 10.1007/978-981-10-0687-6_4.

[16] D. Fengel and G. Wegener, *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, 2011.

[17] D. K. Shen and S. Gu, 'The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products', *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 24, pp. 6496–6504, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2009.06.095.

[18] N. Worasuwannarak, T. Sonobe, and W. Tanthapanichakoon, 'Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 78, no. 2, pp. 265–271, 2007, doi: 10.1016/j.jaap.2006.08.002.

[19] G. Lv and S. Wu, 'Analytical pyrolysis studies of corn stalk and its three main components by TG-MS and Py-GC/MS', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 97, pp. 11–18, 2012, doi: 10.1016/j.jaap.2012.04.010.

[20] F.-X. Collard and J. Blin, 'A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 594–608, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.06.013.

[21] A. Tursi, 'A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion', *Biofuel Research Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 962–979, 2019, doi: 10.18331/BRJ2019.6.2.3.

[22] P. Basu, 'Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory', *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, pp. 1–530, Jul. 2013.

[23] H. Yu, Y. Huang, H. Ying, and C. Xiao, 'Preparation and characterization of a quaternary ammonium derivative of konjac glucomannan', *Carbohydrate Polymers*, pp. 29–40, 2007, doi: 10.1016/j.carbpol.2006.08.024.

[24] Y. Peng and S. Wu, ‘The structural and thermal characteristics of wheat straw hemicellulose’, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 88, no. 2, pp. 134–139, 2010, doi: 10.1016/j.jaap.2010.03.006.

[25] F.-X. Collard, ‘Nouvelles stratégies catalytiques pour la gazéification de la biomasse : influence de métaux imprégnés sur les mécanismes de pyrolyse’, Thèse de doctorat, Institut 2iE, 2012.

[26] J.-S. Kim, ‘Production, separation and applications of phenolic-rich bio-oil – A review’, *Bioresource Technology*, vol. 178, pp. 90–98, 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.121.

[27] H. Li, Y. Qu, and J. Xu, ‘Microwave-Assisted Conversion of Lignin’, in *Production of Biofuels and Chemicals with Microwave*, Z. Fang, Jr. Smith Richard L., and X. Qi, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, pp. 61–82. doi: 10.1007/978-94-017-9612-5_4.

[28] C. Lapierre, B. Pollet, and C. Rolando, ‘New insights into the molecular architecture of hardwood lignins by chemical degradative methods’, *Research on Chemical Intermediates*, vol. 21, no. 3, pp. 397–412, 1995, doi: 10.1007/BF03052266.

[29] G. Neutelings, ‘Lignin variability in plant cell walls: Contribution of new models’, *Plant Science*, vol. 181, no. 4, pp. 379–386, 2011, doi: 10.1016/j.plantsci.2011.06.012.

[30] J. C. del Río, J. Rencoret, A. Gutiérrez, T. Elder, H. Kim, and J. Ralph, ‘Lignin Monomers from beyond the Canonical Monolignol Biosynthetic Pathway: Another Brick in the Wall’, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 8, no. 13, pp. 4997–5012, 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c01109.

[31] A. Oasmaa, E. Kuoppala, S. Gust, and Y. Solantausta, ‘Fast Pyrolysis of Forestry Residue. 1. Effect of Extractives on Phase Separation of Pyrolysis Liquids’, *Energy Fuels*, vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 2003, doi: 10.1021/ef020088x.

[32] X. Guo, S. Wang, K. Wang, Q. Liu, and Z. Luo, ‘Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis’, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 42–46, 2010, doi: 10.1016/S1872-5813(10)60019-9.

[33] A. Alaswad, M. Dassisti, T. Prescott, and A. G. Olabi, ‘Technologies and developments of third generation biofuel production’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1446–1460, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.058.

[34] I. Obernberger, F. Biedermann, W. Widmann, and R. Riedl, ‘Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions’, *Biomass and Bioenergy*, vol. 12, no. 3, pp. 211–224, 1997, doi: 10.1016/S0961-9534(96)00051-7.

[35] P. Thy, C. Yu, B. M. Jenkins, and C. E. Lesher, 'Inorganic Composition and Environmental Impact of Biomass Feedstock', *Energy Fuels*, vol. 27, no. 7, pp. 3969–3987, 2013, doi: 10.1021/ef400660u.

[36] F. Dalena, A. Senatore, A. Tursi, and A. Basile, '17 - Bioenergy production from second- and third-generation feedstocks', in *Bioenergy Systems for the Future*, Eds., Woodhead Publishing, 2017, pp. 559–599. doi: 10.1016/B978-0-08-101031-0.00017-X.

[37] P. McKendry, 'Energy production from biomass (part 1): overview of biomass', *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, Art. no. 1, 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.

[38] C. Brunschwig, W. Moussavou, and J. Blin, 'Use of bioethanol for biodiesel production', *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, no. 2, pp. 283–301, 2012, doi: 10.1016/j.pecs.2011.11.001.

[39] A. Oasmaa *et al.*, 'Controlling the Phase Stability of Biomass Fast Pyrolysis Bio-oils', *Energy Fuels*, vol. 29, no. 7, pp. 4373–4381, 2015, doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b00607.

[40] J. Lédé, 'Biomass Pyrolysis: Comments on Some Sources of Confusions in the Definitions of Temperatures and Heating Rates', *Energies*, vol. 3, no. 4, Art. no. 4, 2010, doi: 10.3390/en3040886.

[41] S. Sfakiotakis and D. Vamvuka, 'Development of a modified independent parallel reactions kinetic model and comparison with the distributed activation energy model for the pyrolysis of a wide variety of biomass fuels', *Bioresource Technology*, vol. 197, pp. 434–442, 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2015.08.130.

[42] R. Stephen, 'Turns. An introduction to combustion: concepts and applications', *Mechanical Engineering Series. McGraw Hill*, 2000.

[43] P. McKendry, 'Energy production from biomass (part 2): conversion technologies', *Bioresource Technology*, pp. 47–54, 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00119-5.

[44] J. Sánchez, M. D. Curt, N. Robert, and J. Fernández, 'Chapter Two - Biomass Resources', in *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, C. Lago, N. Caldés, and Y. Lechón, Eds., Academic Press, 2019, pp. 25–111. doi: 10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9.

[45] F. Allal, 'Patrons de variabilité chez Vitellaria paradoxa (karité) : étude phylogéographique et analyse combinée de la variation des acides gras, des tocophérols et de gènes candidats', Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, France, 2010.

[46] J. B. Hall, D. P. Aebischer, H. F. Tomlinson, E. Osei-Amaning, and J. Hindle, 'Vitellaria paradoxa: A monograph.', 1996.

[47] T. Teketay, 'Vitellaria paradoxa subsp. nilotica, a multipurpose industrial oilseed tree: Botany, distribution, ecology and uses', *Walia*, pp. 3–18, 2003.

[48] F. Barry, 'Fiche sectorielle : karité du Burkina Faso'. Accessed: Jan. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.apexb.bf/intelligences-de-marches/filieres

[49] S. Maranz and Z. Wiesman, 'Evidence for indigenous selection and distribution of the shea tree, Vitellaria paradoxa, and its potential significance to prevailing parkland savanna tree patterns in sub-Saharan Africa north of the equator', *Journal of Biogeography*, vol. 30, no. 10, pp. 1505–1516, 2003, doi: 10.1046/j.1365-2699.2003.00892.x.

[50] M. Melzer, 'Valorisation énergétique des sous-produits agricoles en zone sub-saharienne : pré-conditionnement de la biomasse par pyrolyse flash', Thèse de doctorat, Université de Compiègne / Institut 2iE, 2013.

[51] C. Ahouannou, F. P. Tchobo, C. A. Toukourou, F. Kougbadi, and M. M. Soumanou, 'Influence des opérations thermiques impliquées dans les procédés traditionnels d'extraction du beurre de karité au Bénin', *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 7, no. 5, Art. no. 5, 2013, doi: 10.4314/ijbcs.v7i5.31.

[52] I. Lambert, 'Effect of nut roasting temperature, extraction, process and packaging material on the storage properties of shea butter', *West Indian Journal of Engineering*, 2007.

[53] K. Kpegba, S. A. Kpokanu, O. Simalou, K. M. Novidzro, and K. H. Koumaglo, 'Evaluation des techniques de production du beurre de karité au Togo', *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2017, doi: 10.4314/ijbcs.v11i4.14.

[54] G. Son, S. G. Yé, and A. Kabore, 'Besoins et pratiques du dosage de l'eau du procédé d'extraction du beurre de karité par barattage', *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, vol. 14, pp. 45–52, 2012.

[55] J. B. Hall, D. P. Aebischer, H. F. Tomlinson, E. Osei-Amaning, and J. Hindle, 'Vitellaria paradoxa: A monograph.', 1996.

[56] R. Kumar Singh, T. Patil, D. Pandey, and A. N. Sawarkar, 'Pyrolysis of mustard oil residue: A kinetic and thermodynamic study', *Bioresource Technology*, vol. 339, p. 125631, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125631.

[57] N. Gouda and A. K. Panda, 'Determination of kinetic and thermodynamic parameters of thermal degradation of different biomasses for pyrolysis', *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 21, p. 101315, 2019, doi: 10.1016/j.bcab.2019.101315.

[58] Y. Rahib, B. Sarh, S. Bostyn, S. Bonnamy, T. Boushaki, and J. Chaoufi, 'Non-isothermal kinetic analysis of the combustion of argan shell biomass', *Materials Today: Proceedings*, vol. 24, pp. 11–16, 2020.

[59] D. S. Bajwa, T. Peterson, N. Sharma, J. Shojaeiarani, and S. G. Bajwa, ‘A review of densified solid biomass for energy production’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 296–305, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.040.

[60] N. Kongkaew, W. Pruksakit, and S. Patumsawad, ‘Thermogravimetric Kinetic Analysis of the Pyrolysis of Rice Straw’, *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 663–670, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.552.

[61] C. I. Akor *et al.*, ‘Thermokinetic study of residual solid digestate from anaerobic digestion’, *Chemical Engineering Journal*, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127039.

[62] C. F. Dickinson and G. R. Heal, ‘A review of the ICTAC Kinetics Project, 2000: Part 1. Isothermal results’, *Thermochimica Acta*, pp. 1–14, 2009, doi: 10.1016/j.tca.2009.05.003.

[63] S. Vyazovkin *et al.*, ‘ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of multi-step kinetics’, *Thermochimica Acta*, p. 178597, 2020, doi: 10.1016/j.tca.2020.178597.

[64] A. Demirbaş, ‘Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals’, *Energy Conversion and Management*, pp. 1357–1378, 2001, doi: 10.1016/S0196-8904(00)00137-0.

[65] S. C. Bhattacharya, S. Sett, and R. M. Shrestha, ‘State of the Art for Biomass Densification’, *Energy Sources*, pp. 161–182, 1989, doi: 10.1080/00908318908908952.

[66] J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess, and K. L. Kenney, ‘A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application’, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, pp. 683–707, 2011, doi: 10.1002/bbb.324.

[67] S. Mani, 'A systems analysis of biomass densification process', University of British Columbia, 2005.

[68] N. Kaliyan and R. V. Morey, ‘Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass’, *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 3, pp. 1082–1090, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.064.

[69] P. S. Lam, S. Sokhansanj, X. Bi, C. J. Lim, and S. Melin, ‘Energy Input and Quality of Pellets Made from Steam-Exploded Douglas Fir (Pseudotsuga menziesii)’, *Energy Fuels*, vol. 25, no. 4, pp. 1521–1528, 2011, doi: 10.1021/ef101683s.

[70] S. Mani, L. Tabil, and S. Sokhansanj, ‘An overview of compaction of biomass grinds’, *Powder Handling and Processing*, vol. 15, pp. 160–168, May 2003.

[71] N. Kaliyan and R. Vance Morey, ‘Factors affecting strength and durability of densified biomass products’, *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 3, Art. no. 3, 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005.

[72] E. Alakangas and P. Paju, ‘Wood pellets in Finland-technology, economy and market’, 2002.

[73] P. Grover and S. Mishra, *Biomass briquetting: technology and practices*, vol. 46. Food and Agriculture Organization of the United Nations Bangkok, Thailand, 1996.

[74] M. Prabaharan and V. Amarnath, ‘Structural optimization of 5ton hydraulic press and scrap baling press for cost reduction by topology’, *International Journal of Modeling and Optimization*, vol. 1, no. 3, p. 185, 2011.

[75] N. E. Altun, C. Hicyilmaz, and M. V. Kök, ‘Effect of Different Binders on the Combustion Properties of Lignite Part I. Effect on thermal properties’, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 65, no. 3, pp. 787–795, 2001, doi: 10.1023/A:1011915829632.

[76] G. Zhang, Y. Sun, and Y. Xu, ‘Review of briquette binders and briquetting mechanism’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 477–487, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.072.

[77] T. B. Reed, G. Trezek, and L. Diaz, ‘Biomass densification energy requirements’, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 0097–6156, 1979.

[78] A. Demirbas and A. Sahin-Demirbas, ‘Briquetting Properties of Biomass Waste Materials’, *Energy Sources*, pp. 83–91, 2004, doi: 10.1080/00908310490251918.

[79] Y. Li and H. Liu, ‘High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel’, *Biomass and Bioenergy*, pp. 177–186, 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(00)00026-X.

[80] M. Al-Widyan, H. Al-Jalil, M. Abu-Zreig, and N. Abu-Hamdeh, ‘Physical durability and stability of olive cake briquettes’, *Canadian biosystems engineering*, pp. 3–41, 2002.

[81] J. Bradfield and M. Levi, ‘Effect of species and wood to bark ratio on pelleting of southern woods.’, 1984.

[82] I. E. Smith, S. D. Probert, R. E. Stokes, and R. J. Hansford, ‘The briquetting of wheat straw’, *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 22, no. 2, pp. 105–111, 1977, doi: 10.1016/0021-8634(77)90054-3.

[83] S. Bello and M. A. Onilude, ‘Physico-mechanical Characteristics of High Density Briquettes produced from Composite Sawdust’, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, vol. 24, pp. 779–787, 2020, doi: 10.4314/jasem.v24i5.8.

[84] N. Szpisják-Gulyás, A. N. Al-Tayawi, Z. H. Horváth, Z. László, S. Kertész, and C. Hodúr, ‘Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review’, *Acta Alimentaria*, pp. 521-537, 2023, doi: 10.1556/066.2023.00235.

[85] G. Hanrahan, J. Zhu, S. Gibani, and D. Patil, ‘Chemometrics and statistics| experimental design’, 2005.

[86] M. Musah, M. Umar, and M. Alkali, ‘Preliminary Studies on Biofuel Potentials of Shea Nut Cakes in Niger State, Nigeria’, *Caliphate Journal of Science and Technology*, vol. 1, pp. 76–82, 2021.

[87] L. I. Darvell *et al.*, ‘Combustion properties of some power station biomass fuels’, *Fuel*, vol. 89, no. 10, pp. 2881–2890, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.03.003.

[88] S. Munir, S. S. Daood, W. Nimmo, A. M. Cunliffe, and B. M. Gibbs, ‘Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres’, *Bioresource Technology*, pp. 1413–1418, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.07.065.

[89] M. Melzer, J. Blin, A. Bensakhria, J. Valette, and F. Broust, ‘Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues’, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 104, pp. 448–460, 2013, doi: 10.1016/j.jaap.2013.05.027.

[90] G. I. Abubakar *et al.*, ‘Energy Potential of Shea Kernel Cake Briquette as Solid Fuel for Domestic and Industrial Applications.’, *IOSR Journal of Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 8–14, 2021.

[91] S. Li, S. Xu, S. Liu, C. Yang, and Q. Lu, ‘Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas’, *Fuel Processing Technology*, vol. 85, no. 8, pp. 1201–1211, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.fuproc.2003.11.043.

[92] A. Álvarez, C. Pizarro, R. García, J. L. Bueno, and A. G. Lavín, ‘Determination of kinetic parameters for biomass combustion’, *Bioresource Technology*, vol. 216, pp. 36–43, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.05.039.

[93] A. C. R. Lim, B. L. F. Chin, Z. A. Jawad, and K. L. Hii, ‘Kinetic Analysis of Rice Husk Pyrolysis Using Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) Method’, *Procedia Engineering*, vol. 148, pp. 1247–1251, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.486.

[94] M. J. Starink, ‘The determination of activation energy from linear heating rate experiments: a comparison of the accuracy of isoconversion methods’, *Thermochimica Acta*, vol. 404, no. 1, pp. 163–176, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0040-6031(03)00144-8.

[95] S. Vyazovkin, A. K. Burnham, J. M. Criado, L. A. Pérez-Maqueda, C. Popescu, and N. Sbirrazzuoli, ‘ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data’, *Thermochimica Acta*, vol. 520, no. 1, pp. 1–19, 2011, doi: 10.1016/j.tca.2011.03.034.

[96] J. Cai *et al.*, 'Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 309–322, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.072.

[97] M. A. Martín-Lara, A. Pérez, M. A. Vico-Pérez, M. Calero, and G. Blázquez, 'The role of temperature on slow pyrolysis of olive cake for the production of solid fuels and adsorbents', *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 121, pp. 209–220, 2019, doi: 10.1016/j.psep.2018.10.028.

[98] V. Volli and R. K. Singh, 'Pyrolysis kinetics of de-oiled cakes by thermogravimetric analysis', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, doi: 10.1063/1.4811794.

[99] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, Y.-C. Song, W.-Y. Li, and J. Feng, 'Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion', *Fuel*, vol. 208, pp. 377–409, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.07.036.

[100] A. van der Drift, J. van Doorn, and J. W. Vermeulen, 'Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification', *Biomass and Bioenergy*, pp. 45–56, 2001, doi: 10.1016/S0961-9534(00)00045-3.

[101] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, and D. Baxter, 'Trace element concentrations and associations in some biomass ashes', *Fuel*, pp. 292–313, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.04.001.

[102] R. M. Jingura and R. Kamusoko, 'Technical Options for Valorisation of Jatropha Press-Cake: A Review', *Waste Biomass Valor*, pp. 701–713, 2018, doi: 10.1007/s12649-017-9837-9.

[103] X. Zhang *et al.*, 'Highly-efficient nitrogen self-doped biochar for versatile dyes' removal prepared from soybean cake via a simple dual-templating approach and associated thermodynamics', *Journal of Cleaner Production*, vol. 332, p. 130069, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130069.

[104] P. Evon, J. Vinet, L. Labonne, and L. Rigal, 'Influence of thermo-pressing conditions on the mechanical properties of biodegradable fiberboards made from a deoiled sunflower cake', *Industrial Crops and Products*, pp. 117–126, 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.11.036.

[105] B. Pereira, A. Carneiro, A. Márcia, J. Colodette, A. Oliveira, and M. Fontes, 'Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties', *BioResources*, vol. 8, 2013, doi: 10.15376/biores.8.3.4574-4592.

[106] A. N. Adazabra, G. Viruthagiri, and P. Kannan, 'Influence of spent shea waste addition on the technological properties of fired clay bricks', *Journal of Building Engineering*, vol. 11, pp. 166–177, 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.04.006.

[107] M. Arif, Y. Li, M. M. El-Dalatony, C. Zhang, X. Li, and E.-S. Salama, 'A complete characterization of microalgal biomass through FTIR/TGA/CHNS analysis: An approach for biofuel generation and nutrients removal', *Renewable Energy*, pp. 1973–1982, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.066.

[108] S. S. Idris, N. A. Rahman, and K. Ismail, 'Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA)', *Bioresource Technology*, vol. 123, pp. 581–591, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.065.

[109] G. Lawer-Yolar, B. Dawson-Andoh, and E. Atta-Obeng, 'Novel phase change materials for thermal energy storage: Evaluation of tropical tree fruit oils', *Biotechnology Reports*, vol. 24, p. e00359, 2019, doi: 10.1016/j.btre.2019.e00359.

[110] X. G. Li, Y. Lv, B. G. Ma, S. W. Jian, and H. B. Tan, 'Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal', *Bioresource Technology*, pp. 9783–9787, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.07.117.

[111] S. Munir, S. S. Daood, W. Nimmo, A. M. Cunliffe, and B. M. Gibbs, 'Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres', *Bioresource technology*, pp. 1413–1418, 2009.

[112] Q. Wang, W. Zhao, H. Liu, C. Jia, and H. Xu, 'Reactivity and Kinetic Analysis of Biomass during Combustion', *Energy Procedia*, pp. 869–875, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.181.

[113] J. Liu, X. Jiang, H. Cai, and F. Gao, 'Study of Combustion Characteristics and Kinetics of Agriculture Briquette Using Thermogravimetric Analysis', *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15827–15833, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c01249.

[114] E. Moukhina, 'Determination of kinetic mechanisms for reactions measured with thermoanalytical instruments', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 109, no. 3, pp. 1203–1214, 2012, doi: 10.1007/s10973-012-2406-3.

[115] A. Sharma, A. Aravind Kumar, B. Mohanty, and A. N. Sawarkar, 'Critical insights into pyrolysis and co-pyrolysis of poplar and eucalyptus wood sawdust: Physico-chemical characterization, kinetic triplets, reaction mechanism, and thermodynamic analysis', *Renewable Energy*, vol. 210, pp. 321–334, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.066.

[116] E. Moukhina, 'Initial kinetic parameters for the model-based kinetic method.', *High Temperatures-High Pressures*, vol. 42, no. 4, 2013.

[117] I. Boumanchar *et al.*, 'Investigation of (co)-combustion kinetics of biomass, coal and municipal solid wastes', *Waste Management*, pp. 10–18, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.07.033.

[118] R. Fahmi *et al.*, 'The effect of alkali metals on combustion and pyrolysis of Lolium and Festuca grasses, switchgrass and willow', *Fuel*, pp. 1560–1569, 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.11.030.

[119] Z. Liu *et al.*, 'Synergistic effects of mineral matter on the combustion of coal blended with biomass', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 489–496, 2013, doi: 10.1007/s10973-013-3162-8.

[120] J. Oladejo, S. Adegbite, X. Gao, H. Liu, and T. Wu, 'Catalytic and non-catalytic synergistic effects and their individual contributions to improved combustion performance of coal/biomass blends', *Applied Energy*, pp. 334–345, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.052.

[121] G. Wang *et al.*, 'Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends', *Energy Conversion and Management*, pp. 414–426, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.07.045.

[122] Z. Boubacar Laougé and H. Merdun, 'Pyrolysis and combustion kinetics of Sida cordifolia L. using thermogravimetric analysis', *Bioresource Technology*, p. 122602, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122602.

[123] M. H. Tahir, M. A. Mahmood, G. Çakman, and S. Ceylan, 'Pyrolysis of oil extracted safflower seeds: Product evaluation, kinetic and thermodynamic studies', *Bioresource Technology*, vol. 314, p. 123699, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123699.

[124] A. Mainkaew, A. Pattiya, and S. N. Jansri, 'Optimization of elephant dung green fuel briquette production using a low-pressure densification technique and its characterizations, and emissions', *Bioresource Technology Reports*, vol. 21, p. 101328, 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101328.

[125] S. min Lee *et al.*, 'Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with Larix kaempferi C. and Liriodendron tulipifera L. sawdust', *Biomass and Bioenergy*, vol. 48, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.10.015.

[126] D. Huko, D. N. Kamau, and W. O. Ogola, 'Effects of varying particle size on mechanical and combustion characteristics of mango seed shell cashew nut shell composite briquettes', *International Journal of Engineering Science Invention*, pp. 32–39, 2015.

[127] Djomdi, H. Fadimatou, B. Hamadou, L. J. M. Nguela, G. Christophe, and P. Michaud, 'Improvement of thermophysical quality of biomass pellets produced from rice husks', *Energy Conversion and Management: X*, p. 100132, 2021, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100132.

[128] A. Kuhe, A. V. Terhemba, and H. Iortyer, 'Biomass valorization for energy applications: A preliminary study on millet husk', *Heliyon*, p. e07802, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07802.

[129] M. Sawadogo, S. Tchini Tanoh, S. Sidibé, N. Kpai, and I. Tankoano, 'Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste', *Journal of Cleaner Production*, vol. 195, pp. 1047–1056, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.261.

[130] G. C. Wakchaure and I. Mani, 'Effect of Binders and Pressures on Physical Quality of Some Biomass Briquettes', *Journal of Agricultural Engineering (India)*, vol. 46, no. 4, pp. 24–30, 2009, doi: 10.52151/jae2009464.1389.

[131] O. O. Fasina, 'Physical properties of peanut hull pellets', *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 5, pp. 1259–1266, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.02.041.

[132] J. K. Tanui, P. N. Kioni, P. N. Kariuki, and J. M. Ngugi, 'Influence of processing conditions on the quality of briquettes produced by recycling charcoal dust', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 341–350, 2018, doi: 10.1007/s40095-018-0275-7.

[133] O. F. Obi, R. Pecenka, and M. J. Clifford, 'A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters', *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2426, 2022, doi: 10.3390/en15072426.

[134] R. I. Muazu and J. A. Stegemann, 'Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting', *Fuel*, pp. 339–347, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.01.019.

[135] S. R. Richards, 'Physical testing of fuel briquettes', *Fuel Processing Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 89–100, 1990, doi: 10.1016/0378-3820(90)90098-D.

[136] T. Chungcharoen and N. Srisang, 'Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts', *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, p. 120434, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120434.

[137] D. Yahaya and T. Ibrahim, 'Development of rice husk briquettes for use as fuel', *Research journal in engineering and applied sciences*, vol. 1, no. 2, pp. 130–133, 2012.

[138] F. Zoma and M. Sawadogo, 'A multicriteria approach for biomass availability assessment and selection for energy production in Burkina Faso: A hybrid AHP-TOPSIS approach', *Heliyon*, vol. 9, no. 10, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20999.

[139] T. Olugbade, O. Ojo, and T. Mohammed, ‘Influence of Binders on Combustion Properties of Biomass Briquettes: A Recent Review’, *BioEnergy Research*, pp. 241–259, 2019, doi: 10.1007/s12155-019-09973-w.

[140] L. Pang, Y. Yang, L. Wu, F. Wang, and H. Meng, ‘Effect of Particle Sizes on the Physical and Mechanical Properties of Briquettes’, *Energies*, p. 3618, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12193618.

[141] J. Zhang and Y. Guo, ‘Physical properties of solid fuel briquettes made from *Caragana korshinskii* Kom’, *Powder Technology*, pp. 293–299, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.02.025.

[142] S. J. Mitchual, K. Frimpong-Mensah, and N. A. Darkwa, ‘Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes’, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 30, 2013, doi: 10.1186/2251-6832-4-30.

[143] C. Setter, C. H. Ataíde, R. F. Mendes, and T. J. P. de Oliveira, ‘Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks’, *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 8215–8223, 2021, doi: 10.1007/s11356-020-11124-0.

[144] S. H. A. Hassan, A. el Nasser A. Zohri, and R. M. F. Kassim, ‘Electricity generation from sugarcane molasses using microbial fuel cell technologies’, *Energy*, pp. 538–543, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.087.

[145] S. R. Turns, 'An Introduction to Combustion: Concepts and Applications', vol. 287, p. 569, *McGraw-Hill Education*, 1996.

[146] S. Ozgen, S. Cernuschi, and S. Caserini, ‘An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 110113, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110113.

[147] M. R. Mladenović *et al.*, ‘The combustion of biomass - The impact of its types and combustion technologies on the emission of nitrogen oxide’, *Hemijska industrija*, pp. 287–298, 2016, doi: 10.2298/HEMIND150409033M.

[148] *Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants (Text with EEA relevance)*, 2015. Accessed: Aug. 01, 2024. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/dir/2015/2193/oj/eng

[149] G. Jebeso, D. Gebeyehu, and M. Abere, ‘Characteristics and quality of gum arabic derived from naturally grown *Acacia seyal* Willdenow tree in the lowland areas of Ethiopia’, *Food Chemistry Advances*, p. 100243, 2023, doi: 10.1016/j.focha.2023.100243.

[150] T. Nussbaumer and J. E. Hustad, ‘Overview of Biomass Combustion’, in *Developments in Thermochemical Biomass Conversion: Volume 1 / Volume 2*, A. V. Bridgwater and D. G. B. Boocock, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 1997, pp. 1229–1243. doi: 10.1007/978-94-009-1559-6_98.

[151] F. Barry, M. Sawadogo, I. W. K. Ouédraogo, M. Bologo/Traoré, and T. Dogot, ‘Geographical and economic assessment of feedstock availability for biomass gasification in Burkina Faso’, *Energy Conversion and Management: X*, p. 100163, 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100163.

[152] L. Bambara, ‘Analyse et optimisation de la durabilité des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l’Ouest’, Thèse de doctorat, Institut 2iE, Burkina Faso, 2018.

Annexes

Annexes

Annexe 1. Estimation de la quantité de biocombustibles briquettes optimisées produites à partir de la presse locale de capacite 6 kg/h

	Masse de la briquette (kg)	Capacité de la presse (kg/h)	Nombre de briquettes produit par heure	Temps de travail par jour (h)	Nombre de briquettes produit par jour	Nombre de briquettes produit par mois	Masse de briquettes produite par mois (kg)	Nombre de briquettes produit par an	Masse de briquettes produite par an (kg)	Masse de matière première utilisée par an (kg)	Nombre de briquettes produit sur 10 ans	Masse de briquettes produite sur 10 ans (kg)
Briquettes de BBa	0,165	6	36	8	288	6336	1045,44	50688	8363,52	8110,08	506880	83635,2
Briquettes de TPo	0,17	6	36	8	288	6336	1077,12	50688	8616,96	8110,08	506880	86169,6

Annexe 2. Quantités d'énergie et d'eau consommées par la production des biocombustibles briquettes optimisées de BBa et TPo

CONSOMMATION D'ELECTRICITE													
	Capacité du broyeur (kg/h)	Puissance du broyeur (kW)	Energie consommée par heure (kWh)	Type compteur SONABEL	Ampérage	Tranche 1	Prix kWh (F CFA)	Redevance mensuelle (F CFA)	Temps de fonctionnement du broyeur par mois (h)	Energie consommée par mois (kWh)	Coût énergie consommée par mois (F CFA)	Coût énergie consommée par an (F CFA)	Coût énergie consommée sur 10 ans (F CFA)
Briquettes de BBa	50	1,5	1,5	triphasé 4 fils	20-30 A	0-50 kWh	96	1373	20,9088	31,3632	4384	35071	350709
Briquettes de TPo	50	1,5	1,5	triphasé 4 fils	20-30 A	0-50 kWh	96	1373	21,5424	32,3136	4475,1056	35800,8448	358008,448
CONSOMMATION D'EAU													
On considère que les boues de barattage brutes ont un taux d'humidité de 5% et le mélange doit avoir un taux d'humidité final de 12 % On considère que les tourteaux de presse bruts ont un taux d'humidité de 5% et le mélange doit avoir un taux d'humidité de final de 18 %													
	Masse d'eau pour une briquette (g)	Masse volumique de l'eau (kg/l)	Volume d'eau pour une briquette (l)	Volume d'eau pour nettoyage et divers par jour (l)	Volume d'eau pour nettoyage et divers par mois (l)	Nombre de briquettes prod. par mois	Volume d'eau requis par mois (l)	Coût 20 l d'eau borne fontaine ONEA (F CFA)	Coût du volume d'eau requis par mois (FCFA)	Volume d'eau requis par an (l)	Coût du volume d'eau requis par an (FCFA)	Volume d'eau requis pour 10 ans (l)	Coût volume d'eau requis pour 10 ans (FCFA)
Briquettes de BBa	12	1	0,012	10	260	6336	336,032	5	84,008	2688,256	1008	26882,56	10081
Briquettes de TPo	20,8	1	0,0208	10	260	6336	391,7888	5	97,9472	4701,4656	1175,3664	23507,328	5876,832

Annexe 3. Estimation du prix de vente d'un kilogramme de biocombustible briquette optimisée de BBa et TPo

Cas 1 : Briquettes de BBa	Prix d'un kg de bois (F CFA)	Energie d'un kg de bois (MJ)	Energie d'un kg de briquette (MJ)	Prix théorique d'un kg de briquette (F CFA)	Prix fixé d'un kg de briquette (F CFA)	Bénéfice à l'horizon du projet (F CFA)	Bénéfice annuel (F CFA)
Scénario 1	80	18,46	26,5	114,84	115	4 409 841	440 984
Scénario 2	80	18,46	26,5	114,84	115	-2 538 874	-253 887
Cas 2 : Briquettes de TPo							
Scénario 1	80	18,46	21,8	94	94	1 700 831	170 083
Scénario 2	80	18,46	21,8	94	94	-5 247 886	-524 788

Annexe 4. Productions scientifiques

❖ Communications orales

1. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Marie Sawadogo, Abdelaziz Baçaoui, Comparative study of shea churning mud and eucalyptus wood combustions by thermogravimetric analysis, 6th Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-24), 15–18 mai 2024, Marrakech (Maroc)

2. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Marie Sawadogo, Abdelaziz Baçaoui, Optimization of shea churning mud densification by the Box-Behnken response surface design, 9th International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE), 9-11 mai 2024, Marseille (France)

3. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Optimisation de la densification des tourteaux de presse de karité par le plan de surface de réponse Box-Behnken, 11ème édition des Doctoriales de l'Institut 2iE, 12-14 décembre 2023, 2iE Ouagadougou (Burkina Faso)

4. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Comparative study of combustion of shea residues and eucalyptus wood by thermogravimetric analysis, 4èmes Journées Scientifiques Annuelles du Réseau Sous-Régional de Recherche en Energies Renouvelables (RESER-JSA04-2023), 8-10 novembre 2023, Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

5. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Etude de la valorisation énergétique en biocombustibles briquettes des résidus de transformation des amandes de karité produites au Burkina Faso, 10ème édition des Doctoriales de l'Institut 2iE, 13-15 décembre 2022, 2iE Ouagadougou (Burkina Faso)

6. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Characterization and thermogravimetric analysis of processing residues of shea kernels produced in Burkina Faso, 22èmes Journées Scientifiques Annuelles de la Société Ouest-Africaine de Chimie (SOACHIM), 08-12 août 2022, Ouagadougou (Burkina Faso)

❖ **Communication par poster**

1. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Etude de la réactivité thermique des résidus de transformation des amandes de karité produites au Burkina Faso, 10ème édition des Doctoriales de l'Institut 2iE, 13-15 décembre 2022, 2iE Ouagadougou (Burkina Faso)

❖ **Publications scientifiques**

➢ **Articles**

1. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Thermal decomposition of crude and de-oiled shea almond cakes: kinetic and thermodynamic characteristics study using thermogravimetric analysis. Biomass Conv. Bioref., Mar. 2024, doi: 10.1007/s13399-024-05407-6

2. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Marie Sawadogo, Abdelaziz Baçaoui, Comparative study of shea churning mud and eucalyptus wood combustions by thermogravimetric analysis, Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, Springer Nature (article accepté)

➢ **Acte de conférence**

1. Tano Ladji Acka, Igor Wennd Kouni Ouédraogo, Abdelaziz Baçaoui, Marie Sawadogo, Characterization and thermogravimetric analysis of processing residues of shea kernels produced in Burkina Faso, Actes des 22èmes Journées scientifiques annuelles de la SOACHIM, (2024-02-10 16:22:34)(a3)(i12), Pages 1736-1742